

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problems Mailbox.**

THIS PAGE BLANK (USPTO)

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2001 年1 月25 日 (25.01.2001)

PCT

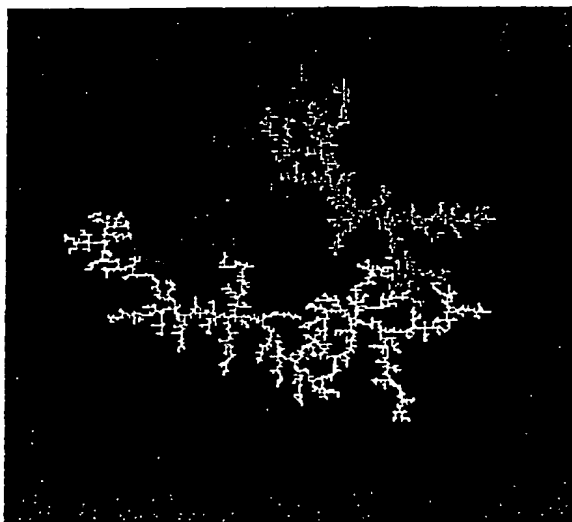
(10) 国際公開番号
WO 01/06406 A1

- (51) 国際特許分類: G06F 17/10 (72) 発明者: および
(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 宇賀神隆一 (UGA-JIN, Ryuichi) [JP/JP]. 黒木義彦 (KUROKI, Yoshihiko) [JP/JP]. 石橋 晃 (ISHIBASHI, Akira) [JP/JP]. 平田晋太郎 (HIRATA, Shintaro) [JP/JP]; 〒141-0001 東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニー株式会社内 Tokyo (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP00/04743
- (22) 国際出願日: 2000 年7 月14 日 (14.07.2000)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (74) 代理人: 杉浦正知 (SUGIURA, Masatomo); 〒171-0022 東京都豊島区南池袋2丁目49番7号 池袋パークビル7階 Tokyo (JP).
- (30) 優先権データ:
特願平11/200866 1999 年7 月14 日 (14.07.1999) JP (81) 指定国 (国内): JP, US.
特願2000/54246 2000 年2 月29 日 (29.02.2000) JP (84) 指定国 (広域): ヨーロッパ特許 (DE, FR, GB).
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): ソニー株式会社 (SONY CORPORATION) [JP/JP]; 〒141-0001 東京都品川区北品川6丁目7番35号 Tokyo (JP).
添付公開書類:
— 国際調査報告書

[続葉有]

(54) Title: METHOD OF FORMING FRACTAL STRUCTURE

(54) 発明の名称: フラクタル構造の形成方法



(57) Abstract: A fractal structure is grown from a plurality of starting points. A fractal structure, grown from respective starting points and interconnected by interactive growths, forms a neural network. A growth speed originated at a specific starting point is determined by the probability of a material reaching a grown portion from a remote location by means of a diffusion process and the probability of a growth promoting factor reaching a grown portion by means of a diffusion process from a portion grown from a starting point other than the specific one. Anisotropy is introduced into a space in which a fractal structure is to be grown, as required.

[続葉有]

WO 01/06406 A1



2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(57) 要約:

複数の起点からフラクタル構造を成長させる。それぞれの起点から成長するフラクタル構造は相互作用しながら成長して互いに連結したフラクタル構造を形成し、神経回路網を構成する。ある特定の起点からの成長速度は、遠方から拡散過程によって材料が既成長部分に到達する確率と、それ以外の起点から成長した部分からの拡散過程によって成長促進因子が既成長部分に到達する確率とにより決定される。必要に応じて、フラクタル構造を成長させる空間に異方性を導入する。

明 細 書

フラクタル構造の形成方法

5 技術分野

この発明は、フラクタル構造の形成方法に関し、例えば、神経回路網などの複雑なネットワークの構成に適用して好適なものである。

背景技術

- 10 従来のノイマン型コンピュータは、具体的なアルゴリズムを逐次実行して行く計算で大いに威力を発揮し現代の科学技術を支えている。このコンピュータのCPUを設計するためには、複雑な電子回路を生成してそのシミュレーションを実行することで、最適化して行かなければならない。その設計ツールとして、複雑な電子回路を生成するC
- 15 ADシステムはなくてはならない存在である。

- 近年、ニューラル・ネットワーク・モデルなど、脳に学ぶ情報処理が広く研究され、図形認識などに威力を発揮しており、実用化が期待されている。ニューラル・ネットワーク・モデルを現実のデバイス化するとき、脳の神経回路網のようなネットワークをなにがしかの物で
- 20 実現することが好ましい。この方針に従い、生体の神経を人工的に形成する実験も行われており、将来が期待されている。

- 脳の神経細胞は、その一つひとつが複雑な樹状突起を持ち、フラクタル(fractal)的な形状をしている。そのフラクタル的な要素がお互いに相互作用しながら成長し、複雑な脳の神経回路網のネットワーク
- 25 を形成している。

好ましいネットワークの動作をシミュレートするためには、脳の神

経回路網を生成する技法が必要である。つまり、従来のノイマン型コンピュータにとってのCADシステムに対応する、複雑なネットワークを構成する技法が切望されている。しかしながら、複数のフラクタル要素が結合する構造をそのフラクタル的な性質を制御しながら構成する手法は従来なかった。

従って、この発明が解決しようとする課題は、神経回路網などの複雑なネットワークを制御性良くしかも容易に構成することができるフラクタル構造の形成方法を提供することにある。

この発明が解決しようとする他の課題は、異なるフラクタル構造間の結合状態を制御することができ、より多彩な構造の神経回路網などの複雑なネットワークを制御性良くしかも容易に構成することができるフラクタル構造の形成方法を提供することにある。

発明の開示

本発明者は、上記課題を解決すべく鋭意検討を行った結果、複数の起点からそれぞれフラクタル構造を成長させ、それらを相互作用させることにより、神経回路網などの複雑なネットワークを構成することができることを見い出し、また、フラクタル構造を成長させる空間に異方性を導入することにより、フラクタル構造間の結合状態を制御することが可能であることを見い出し、この発明を案出するに至ったものである。

すなわち、上記課題を解決するために、この発明は、

複数の起点からフラクタル構造をそれぞれ成長させ、それぞれの起点から成長するフラクタル構造を相互作用させながら成長させて互いに連結したフラクタル構造を形成するようにした

ことを特徴とするフラクタル構造の形成方法である。

この発明においては、各起点からのフラクタル構造の成長過程のゆらぎに対し普遍的な要素フラクタル構造間の相互作用が制御される。

この発明において、例えば、複数の起点のうちのある特定の起点からの成長速度は、遠方から拡散過程によって材料が既成長部分に到達する確率と、それ以外の起点から成長した部分からの拡散過程によって成長促進因子が既成長部分に到達する確率とにより決定される。この成長速度は、例えば、遠方から拡散過程によって材料が既成長部分に到達する確率の巾関数と、それ以外の起点から成長した部分からの拡散過程によって成長促進因子が既成長部分に到達する確率の巾関数との積に比例する。また、この発明においては、典型的には、構造のフラクタル性または自己相似性または複雑さまたは結合の数を概ねパラメトリックに制御可能とする。より具体的には、例えば、複数の起点から成長したそれぞれのフラクタル構造間の成長促進因子の拡散を決定する相対電位を、無限遠点に対して適当に調整することにより、構造のフラクタル性または自己相似性または複雑さまたは結合の数を概ねパラメトリックに制御可能とする。

この発明においては、フラクタル構造を成長させる空間に異方性を導入する場合もある。具体的には、例えば、複数の起点のうちのある特定の起点からの成長速度が、遠方から拡散過程によって材料が既成長部分に到達する確率と、それ以外の起点から成長した部分からの拡散過程によって成長促進因子が既成長部分に到達する確率とにより決定される場合において、フラクタル構造を成長させる空間における拡散過程の拡散係数が異方性を有する。これらの場合も、典型的には、構造のフラクタル性または自己相似性または複雑さまたは結合の数を概ねパラメトリックに制御可能とする。異方性は拡散係数の異方性に限られず、例えばフラクタル構造を成長させる空間の誘電率の異方性

などであってもよい。

上述のように構成されたこの発明によるフラクタル構造の形成方法によれば、複数の起点からフラクタル構造をそれぞれ成長させ、それぞれの起点から成長するフラクタル構造を相互作用させながら成長させて互いに連結したフラクタル構造を形成するようにしていることにより、各要素がフラクタル的な複雑さを持ちつつ、その要素によるネットワークを制御性良くしかも容易に構成することができる。

また、フラクタル構造を成長させる空間に異方性を導入する場合には、それぞれの起点から成長するフラクタル構造が相互作用しながら成長して互いに連結したフラクタル構造を形成するときに、単一のフラクタル構造の内部で発現する応答が、異なるフラクタル構造間の結合により、より強力な非線形効果を受ける。ここで、フラクタル構造間の結合状態の制御の指針として異なるフラクタル構造の接する点の数に注目し、この点の数を制御することによりこの非線形性を制御することが可能である。

図面の簡単な説明

第1図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第2図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第3図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第4図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第5図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第6図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第7図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第8図は、

この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 9 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 10 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 11 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 12 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 13 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 14 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 15 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 16 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 17 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 18 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 19 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 20 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 21 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 22 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 23 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 24 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 25 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 26 図は、この発明による神経回路網の形成のシミュレーションの結果を示す略線図、第 27 図は、この発明において三次元格子上で異方向性を z 軸方向のみに導入したときの神経回路網の形成における z 軸方

向分布の標準偏差の異方性パラメータに対する変化を示す略線図、第 28 図は、この発明において三次元格子上で異方性を z 軸方向のみに導入したときの神経回路網の形成における成長ステップに対するフラクタル図形間の隣接点の数の変化を示す略線図、第 29 図は、この発明の結合フラクタルネットワークの成長のシミュレーションの結果を示す略線図、第 30 図は、この発明の結合フラクタルネットワークの成長のシミュレーションの結果を示す略線図、第 31 図は、この発明の結合フラクタルネットワークの成長のシミュレーションの結果を示す略線図、第 32 図は、この発明の結合フラクタルネットワークの成長のシミュレーションの結果を示す略線図、第 33 図は、この発明の結合フラクタルネットワークの成長のシミュレーションの結果を示す略線図、第 34 図は、この発明の結合フラクタルネットワークの成長のシミュレーションの結果を示す略線図、第 35 図は、この発明の結合フラクタルネットワークの成長のシミュレーションにおける成長のステップに対する重心間距離の変化を示す略線図、第 36 図は、この発明の結合フラクタルネットワークの成長のシミュレーションにおける成長ステップに対する重心間距離の変化を示す略線図、第 37 図は、この発明の結合フラクタルネットワークの成長のシミュレーションにおける成長ステップに対する重心間距離の変化を示す略線図、第 38 図は、この発明の結合フラクタルネットワークの成長のシミュレーションにおける成長ステップに対する重心間距離の変化を示す略線図、第 39 図は、この発明の結合フラクタルネットワークの成長のシミュレーションにおける成長ステップに対する重心間距離の変化を示す略線図、第 40 図は、この発明の結合フラクタルネットワークの成長のシミュレーションにおける成長ステップに対する重心間距離の変化を示す略線図である。

発明を実施するための最良の形態

以下、この発明の実施形態について図面を参照しながら説明する。

(1) Dielectric breakdown model

- 5 まず単独のフラクタル図形（例えば樹状突起のような図形）を形成
する方法を説明する((1)A. Erzan, L. Pietronero, A. Vespignani, Rev. Mo
d. Phys. 67, 545(1995), (2)T. A. Witten, Jr. and L. M. Sander, Phys. Rev.
Lett. 47, 1400(1984) ; Phys. Rev. B 27, 5686(1983))。この方法はNiem
eyer et al. によって提案されたDielectric breakdown modelである
10 ((3)L. Niemeyer, L. Pietronero, H. J. Wiesmann, Phys. Rev. Lett. 52, 1033
(1984))。

例として二次元空間の正方格子Sを定義し、その格子点(i, j)
∈ S上にスカラーポテンシャル場φ(i, j)を定義し、これを電位と称
する。この電位はラプラス方程式

15

$$\Delta\phi(i, j) = 0 \quad (1)$$

- に従うものとする。これから定義する図形T_nは二次元格子上の格子
点の集合であり、T₀は(0, 0)のみからなり、T_{n+1}は順次、以
20 下に与えるルールにより、T_nに一格子点を付け加えることにより生
成される。

まず、T_nに含まれる各点の電位を1とし、無限遠点での電位を0
とする。つまり、

25

$$\phi(i, j) = 0 \quad \text{when} \quad (i, j) \longrightarrow \infty \quad (2)$$

$$\phi(i, j) = 1 \quad \text{when} \quad (i, j) \in T_n \quad (3)$$

である。この境界条件のもとで方程式 (1) を解き、各格子点の電位を決定する。 T_{n+1} を構成するために T_n に付け加えられるべき格子点
 5 は、 T_n に含まれず、 T_n に最近接する格子点の集合 U_n から選ばれる。 U_n に含まれる格子点の数を N_n と書く。

さて、 U_n に含まれる各点 (i_m, j_m) (ただし、 $m = 1, 2, \dots, N_n$) に対し、その電界強度を

$$10 \quad E_m(\alpha) = |\phi(i_m, j_m) - 1|^\alpha \quad (4)$$

と定義する。 U_n のある点 (i_m, j_m) が選ばれる確率は、その電界強度 $E_m(\alpha)$ に比例する。つまり、その確率は

$$15 \quad p_m(\alpha) = \frac{E_m(\alpha)}{\sum_{j=1}^{N_n} E_j(\alpha)} \quad (5)$$

である。

以上の操作を繰り返すことで T_n を構成して行く。理想的なフラクタルは、無限に繰り返した極限集合

$$20 \quad T_\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} T_n \quad (6)$$

であろう。また、 $\alpha = 1$ の場合は上記と Diffusion limited aggregation による図形生成の結果は一致する ((2) T. A. Witten, Jr. and L. M. Sander, Phys. Rev. Lett. 47, 1400 (1984) ; Phys. Rev. B 27, 5686 (1983)) 。

(2) 相互作用しながら成長するフラクタルス

以下に、相互作用しながら成長するフラクタルス (interacting fractals)、すなわち結合フラクタルネットワーク (coupled-fractal network) を定義する。例として、二次元空間の正方格子 S 上に、 N_c 個の種からなるフラクタルスを考える。格子点 $(i, j) \in S$ 上にスカラーポテンシャル場 $\phi(i, j)$ を定義し、これを電位と称する。そして、 $\psi^{(1)}(i, j)$, $\psi^{(2)}(i, j)$, \dots , $\psi^{(N_c)}(i, j)$ も定義する。これらは、微分方程式

$$\Delta \phi(i, j) = 0 \quad (7)$$

$$\Delta \psi^{(1)}(i, j) = 0 \quad (8)$$

$$\Delta \psi^{(2)}(i, j) = 0 \quad (9)$$

$$\vdots$$

$$\Delta \psi^{(N_c)}(i, j) = 0 \quad (10)$$

を満たす。これから定義する図形 T_n は二次元格子上的格子点の集合であり、その各格子点は、 N_c 個の種に分類されている。すなわち、

$$T_n = \bigcup_{j=1}^{N_c} Q_n^{(j)} \quad (11)$$

であり、各種は互いに排他的である。つまり、

$$Q_n^{(j)} \cap Q_n^{(k)} = \emptyset \text{ if } j \neq k \quad (12)$$

である。 $Q_0^{(k)}$ は単一の格子点 $(i_{ini}^{(k)}, j_{ini}^{(k)})$ のみからなり、 T_{n+1} は順次、以下に与えるルールにより、 T_n に一格子点を付け加えることにより生成される。まず、

$$5 \quad \phi(i, j) = 0 \quad \text{when} \quad (i, j) \longrightarrow \infty \quad (13)$$

$$\phi(i, j) = 1 \quad \text{when} \quad (i, j) \in T_n \quad (14)$$

の境界条件のもとで方程式 (7) を解き、各格子点の電位を決定する。

10 また、

$$\psi^{(k)}(i, j) = 0 \quad \text{when} \quad (i, j) \longrightarrow \infty \quad (15)$$

$$\psi^{(k)}(i, j) = 1 \quad \text{when} \quad (i, j) \in Q_n^{(k)} \quad (16)$$

$$15 \quad \psi^{(k)}(i, j) = -1 \quad \text{when} \quad (i, j) \in Q_n^{(l)} \quad (k \neq l) \quad (17)$$

の境界条件のもとで方程式 (8) ~ (10) を解き、 $\psi^{(k)}(i, j)$ を決定する。

T_{n+1} を構成するために T_n に付け加えられるべき格子点は、 T_n に含まれず、 $Q_n^{(k)}$ に最近接する格子点の集合 $U_n^{(k)}$ から選ばれる。

20 $U_n^{(k)}$ に含まれる格子点の数を $N_n^{(k)}$ と書く。つまり、 T_n に付け加えられるべき格子点は、以下の集合

$$U_n = \bigcup_{k=1}^{N_c} U_n^{(k)} \quad (18)$$

25 から選ばれ、その集合に含まれる格子点の数、つまり候補者数は

$$N_n = \sum_{k=1}^{N_c} N_n^{(k)} \quad (19)$$

である。

- さて、 $U_n^{(k)}$ に含まれる各点 $(i_m^{(k)}, j_m^{(k)})$ ($m = 1, 2, \dots, N_n^{(k)}$)
 5 に対し、その電界強度を

$$E_m^{(k)}(\alpha, \beta) = |\phi(i_m^{(k)}, j_m^{(k)}) - 1|^\alpha \times |\psi^{(k)}(i_m^{(k)}, j_m^{(k)}) - 1|^\beta \quad (20)$$

のように定義する。

- 10 U_n のある点 $(i_m^{(k)}, j_m^{(k)})$ が選ばれる確率は、その電界強度
 $E_m^{(k)}(\alpha, \beta)$ に比例する。つまり、その確率は、

$$p_m^{(k)}(\alpha, \beta) = \frac{1}{\Delta} E_m^{(k)}(\alpha, \beta) \quad (21)$$

15
$$\Delta = \sum_{k=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_n^{(k)}} E_j^{(k)}(\alpha, \beta) \quad (22)$$

である。以上の操作を繰り返すことで T_n を構成して行く。

- ここで、以上のモデルに関する物理的（または生理学的）解釈を与えておく。 $\phi(i, j)$ は、Dielectric breakdown modelの解釈より、遠
 20 方から拡散により運ばれてくる成長材料 S_{rc} の成長可能領域への到達確率を与えている。一方、 $\phi_k(i, j)$ は、 k 番目の種の成長可能領域へ k 番目を除く種の既成長部分から拡散により運ばれてくる、なにがしかの物質 X の到達確率を与えている。 k 番目の種の成長が起こる確率
 25 がその積に比例するとしているのは成長材料 S_{rc} と物質 X とがともに到達している時のみ成長が起こると仮定していることを意味する。
 つまり、成長材料 S_{rc} が接着物質 X により k 番目の種の既成長部分に

付着することにより成長が起こる状況を想定している。もちろん、この接着物質Xの介在する付着が律速している反応という意味である。あるいは、別の解釈では、 $\phi(i, j)$ は上記と同様に、遠方から拡散により運ばれてくる成長材料 S_{rc} の成長可能領域への到達確率を与え、
5 一方、 $\phi_k(i, j)$ は k 番目の種の位置における電位を与え、 k 番目の種の成長が起こる確率が成長材料 S_{rc} の到達確率と電界強度との積に比例すると考えることもできる。

上記(2)のモデルに基づく神経回路網の形成方法の具体例について説明する。シミュレーション結果の一つを第1図に示す。このシミュレーションでは、 $(\alpha, \beta) = (0.5, 1.0)$ を用い、4点から4000ステップ成長を行った。第2図では同じ (α, β) を用い、3点から3000ステップ成長を行った。また、パラメータを変化させることで様々な図形を生成することができる。遠方から運ばれてくる成長材料に対応する α が大きいと、各要素は広がる傾向を持ち、近傍の接着物質に対応する β が大きいと、結合は密となる。 (α, β) を変化させ、2点から2000ステップ成長を行ったときの図形を第3図～第7図に示す。第3図では上述の二例と同様に、 $(\alpha, \beta) = (0.5, 1.0)$ を用いた。これより β を増加させた場合を、第4図～第6図に示す。第4図では $(\alpha, \beta) = (0.5, 1.5)$ 、第5図では $(\alpha, \beta) =$
10 $(0.5, 2.0)$ 、第6図では $(\alpha, \beta) = (0.5, 2.5)$ をそれぞれ用いた。 β が増加するに従って、結合が密になって行くのが分かる。一方、 α と β との大小関係を逆転させると第7図 $[(\alpha, \beta) = (1.0, 0.5)]$ のように、遠方に開いて成長が進む傾向となる。このように、パラメータ α と β とを変化させることで、図形の性質を制御しながら様々な
20 神経回路網構造を生成することができる。

(3) 拡張された、相互作用しながら成長するフラクタルス

以下に、拡張された、相互作用しながら成長するフラクタルス、すなわち結合フラクタルネットワークを定義する。例として二次元空間の正方格子 S 上に N_c 個の種からなるフラクタルスを考える。格子点 $(i, j) \in S$ 上にスカラーポテンシャル場 $\phi(i, j)$ を定義し、これを電位と称する。そして、 $\psi^{(1)}(i, j), \psi^{(2)}(i, j), \dots, \psi^{(N_c)}(i, j)$ も定義する。これらは、微分方程式

$$\Delta \phi(i, j) = 0 \quad (23)$$

$$\Delta \psi^{(1)}(i, j) = 0 \quad (24)$$

$$\Delta \psi^{(2)}(i, j) = 0 \quad (25)$$

$$\vdots$$

$$\Delta \psi^{(N_c)}(i, j) = 0 \quad (26)$$

を満たす。これから定義する図形 T_n は二次元格子上の格子点の集合であり、その各格子点は、 N_c 個の種に分類されている。すなわち、

$$T_n = \bigcup_{j=1}^{N_c} Q_n^{(j)} \quad (27)$$

であり、各種は互いに排他的である。つまり、

$$Q_n^{(j)} \cap Q_n^{(k)} = \emptyset \text{ if } j \neq k \quad (28)$$

である。 $Q_0^{(k)}$ は単一の格子点 $(i_{\text{ini}}^{(k)}, j_{\text{ini}}^{(k)})$ のみからなり、 T_{n-1} は

順次、以下に与えるルールにより、 T_n に一格子点を付け加えることにより生成される。まず、

$$\phi(i, j) = 0 \quad \text{when} \quad (i, j) \longrightarrow \infty \quad (29)$$

5

$$\phi(i, j) = 1 \quad \text{when} \quad (i, j) \in T_n \quad (30)$$

の境界条件のもとで方程式(23)を解き、各格子点の電位を決定する。また、

10

$$\psi^{(k)}(i, j) = \psi_\infty \quad \text{when} \quad (i, j) \longrightarrow \infty \quad (31)$$

$$\psi^{(k)}(i, j) = 1 \quad \text{when} \quad (i, j) \in Q_n^{(k)} \quad (32)$$

15

$$\psi^{(k)}(i, j) = -1 \quad \text{when} \quad (i, j) \in Q_n^{(l)} \quad (k \neq l) \quad (33)$$

の境界条件のもとで方程式(24)～(26)を解き、 $\psi^{(k)}(i, j)$ を決定する。 T_{n+1} を構成するために T_n に付け加えられるべき格子点は、 T_n に含まれず、 $Q_n^{(k)}$ に最近接する格子点の集合 $U_n^{(k)}$ から選ばれる。

20

$U_n^{(k)}$ に含まれる格子点の数を $N_n^{(k)}$ と書く。つまり、 T_n に付け加えられるべき格子点は、以下の集合

$$U_n = \bigcup_{k=1}^{N_c} U_n^{(k)} \quad (34)$$

25

から選られ、その集合に含まれる格子点の数、つまり候補者数は

$$N_n = \sum_{k=1}^{N_c} N_n^{(k)} \quad (35)$$

である。

5 さて、 $U_n^{(k)}$ に含まれる各点 $(i_m^{(k)}, j_m^{(k)})$ に対し、その電界強度を

$$E_m^{(k)}(\alpha, \beta) = |\phi(i_m^{(k)}, j_m^{(k)}) - 1|^\alpha \times |\psi^{(k)}(i_m^{(k)}, j_m^{(k)}) - 1|^\beta \quad (36)$$

のように定義する。

10 U_n のある $(i_m^{(k)}, j_m^{(k)})$ が選ばれる確率は、その電界強度 $E_m^{(k)}(\alpha, \beta)$ に比例する。つまり、その確率は、

$$p_m^{(k)}(\alpha, \beta) = \frac{1}{\Delta} E_m^{(k)}(\alpha, \beta) \quad (37)$$

$$15 \quad \Delta = \sum_{k=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_n^{(k)}} E_j^{(k)}(\alpha, \beta) \quad (38)$$

である。以上の操作を繰り返すことで T_n を構成して行く。

以上のモデルは、 $\psi^{(k)}(i, j)$ の境界条件 $\psi^{(k)}(i, j) = \psi_\infty$ の部分で (2) で説明したモデルを拡張したものとなっている。つまり、

20 $\psi_\infty = 0$ と限定することにより、(2) のモデルに帰着する。

上記 (3) のモデルに基づく神経回路網の形成方法の具体例について説明する。シミュレーション結果を第 8 図～第 14 図に示す。これらのシミュレーションでは、 $(\alpha, \beta) = (0.5, 1.0)$ を用い、3 点から 3000 ステップ成長を行った。第 8 図は、 $\psi_\infty = 0$ の境界条件により成長させた場合であり、上記 (2) の場合と同様である。第 9 図では $\psi_\infty = -1$ 、第 10 図では $\psi_\infty = -0.6$ 、第 11 図では

25

$\psi_{\infty} = -0.2$ を用いた。

ψ_{∞} が負の場合、自分以外の種類に属するフラクタル図形と、無限遠点との電位差が少なくなり、フラクタル図形間の相互作用は弱くなる。一方、 ψ_{∞} を正の値としたものが第 1 2 図～第 1 4 図である。第 1 2 図では $\psi_{\infty} = 1$ 、第 1 3 図では $\psi_{\infty} = 0.6$ 、第 1 4 図では $\psi_{\infty} = 0.2$ を用いた。

$\psi_{\infty} > 0$ の場合は反対に、フラクタル図形間の相互作用が強くなり、より密に集合した形状が得られる。

(4) 異方性を導入した、拡張された、相互作用しながら成長するフラクタルス

以下に、異方性を導入した、拡張された、相互作用しながら成長するフラクタルス、すなわち結合フラクタルネットワークを定義する。例として二次元空間の正方格子 S 上に、 N_c 個の種からなるフラクタルスを考える。このとき、 S を異方的な場と考え、異方性パラメータテンソル $M = (m_{\mu,\nu})$, $L = (l_{\mu,\nu})$ を導入する。格子点 $(i, j) \in S$ 上にスカラーポテンシャル場 $\phi_M(i, j)$ を定義し、これを電位と称する。また、 $\psi_L^{(1)}(i, j), \psi_L^{(2)}(i, j), \dots, \psi_L^{(N_c)}(i, j)$ を定義する。これらは次の微分方程式を満たす。

$$\sum_{\mu,\nu=x,y} \frac{\partial}{\partial r_{\mu}} \frac{1}{m_{\mu,\nu}} \frac{\partial}{\partial r_{\nu}} \phi_M(i, j) = 0 \quad (61)$$

$$\sum_{\mu,\nu=x,y} \frac{\partial}{\partial r_{\mu}} \frac{1}{l_{\mu,\nu}} \frac{\partial}{\partial r_{\nu}} \psi_L^{(1)}(i, j) = 0 \quad (62)$$

$$\sum_{\mu,\nu=x,y} \frac{\partial}{\partial r_{\mu}} \frac{1}{l_{\mu,\nu}} \frac{\partial}{\partial r_{\nu}} \psi_L^{(2)}(i, j) = 0 \quad (63)$$

⋮

$$\sum_{\mu, \nu=x, y} \frac{\partial}{\partial r_\mu} \frac{1}{l_{\mu, \nu}} \frac{\partial}{\partial r_\nu} \psi_L^{(N_c)}(i, j) = 0 \quad (64)$$

ここで、 $\frac{\partial}{\partial r_\mu}$ は格子点上の差分を表し、例えば

$$\frac{\partial \phi_M(i, j)}{\partial r_x} = \frac{\phi_M(i+1, j) - \phi_M(i, j)}{(i+1) - i} \quad (65)$$

である。これから定義する図形 T_n は二次元格子上的格子点の集合であり、その各格子点は N_c 個の種に分類されている。すなわち、

$$T_n = \bigcup_{p=1}^{N_c} Q_n^{(p)} \quad (66)$$

であり、各種は互いに排他的である。つまり、

$$Q_n^{(p)} \cap Q_n^{(q)} = \emptyset, \quad \text{if } p \neq q. \quad (67)$$

である。

$Q_0^{(p)}$ は単一の格子点 $(i_{\text{ini}}^{(p)}, j_{\text{ini}}^{(p)})$ のみからなり、 T_{n+1} は順次、以下に与えるルールにより、 T_n に一格子点を付け加えることにより生成される。まず、

$$\phi_M(i, j) = 0 \quad \text{when } (i, j) \longrightarrow \infty \quad (68)$$

$$\phi_M(i, j) = 1 \quad \text{when } (i, j) \in T_n \quad (69)$$

の境界条件のもとで方程式(61)を解き、各格子点の電位を決定する。

また、

$$\psi_L^{(p)}(i, j) = \psi_\infty \quad \text{when} \quad (i, j) \longrightarrow \infty \quad (70)$$

$$5 \quad \psi_L^{(p)}(i, j) = 1 \quad \text{when} \quad (i, j) \in Q_n^{(p)} \quad (71)$$

$$\psi_L^{(p)}(i, j) = -1 \quad \text{when} \quad (i, j) \in Q_n^{(q)} \quad (p \neq q) \quad (72)$$

10 の境界条件のもとで方程式(62)～(64)を解き、 $\psi_L^{(p)}(i, j)$ を決定する。 T_{n+1} を構成するために T_n に付け加えられるべき格子点は、 T_n に含まれず、 $Q_n^{(p)}$ に最近接する格子点の集合 $U_n^{(p)}$ から選ばれる。

$U_n^{(p)}$ に含まれる格子点の数を $N_n^{(p)}$ と書く。つまり、 T_n に付け加えられるべき格子点は、以下の集合

$$15 \quad U_n = \bigcup_{p=1}^{N_c} U_n^{(p)} \quad (73)$$

から選ばれ、その集合に含まれる格子点の数、つまり候補者数は

$$20 \quad N_n = \sum_{p=1}^{N_c} N_n^{(p)} \quad (74)$$

である。

さて、 $U_n^{(p)}$ に含まれる各点 $(i_m^{(p)}, j_m^{(p)})$ ($m = 1, 2, \dots, N_n^{(p)}$) に対し、その電界強度を

$$25 \quad E_m^{(p)}(\alpha, \beta, M, L) = |\phi_M(i_m^{(p)}, j_m^{(p)}) - 1|^\alpha \times |\psi_L^{(p)}(i_m^{(p)}, j_m^{(p)}) - 1|^\beta \quad (75)$$

のように定義する。

U_n のある点 $(i_m^{(p)}, j_m^{(p)})$ が選ばれる確率は、その電界強度 $E_m^{(p)}(\alpha, \beta, M, L)$ に比例する。つまり、その確率は、

$$5 \quad P_m^{(p)}(\alpha, \beta, M, L) = \frac{1}{\Delta} E_m^{(p)}(\alpha, \beta, M, L) \quad (76)$$

$$\Delta = \sum_{p=1}^{N_c} \sum_{m=1}^{N_n^{(p)}} E_m^{(p)}(\alpha, \beta, M, L) \quad (77)$$

である。以上の操作を繰り返すことで T_n を構成して行く。

- 10 以上のモデルは、方程式 (61) ~ (64) において異方性パラメータを導入したことで上記 (3) のモデルを拡張したものとなっている。
 $m_{\mu,\nu} = m\delta_{\mu,\nu}$, $l_{\mu,\nu} = l\delta_{\mu,\nu}$ ($m, l = \text{const}$) と限定することにより、
 (3) のモデルに帰着する。

- 15 上記 (4) のモデルに基づく神経回路網の形成方法の具体例について説明する。以下にシミュレーション結果を示す。まず、異方性パラメータの導入により、結合フラクタル図形がどのように変化したかを示す。わかりやすくするために、二次元格子上一方向にだけ（ここでは $x-y$ 平面の y 軸方向）異方性を入れる。つまり、

$$20 \quad M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix}, \quad L = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & l \end{pmatrix} \quad (78)$$

- とする。 $(\alpha, \beta) = (0.5, 1.0)$ 、 $\psi_\infty = 0$ とパラメータを固定して、 y 軸上の 2 点から 4000 ステップ成長させた。第 15 図 ~ 第 20 図はそれぞれ $m = 1 = 0.5$ 、 $m = 1 = 0.75$ 、 $m = 1 = 1.0$ 、 $m = 1 = 1.25$ 、 $m = 1 = 1.5$ 、 $m = 1 = 2.0$ としたときの結合フラクタル図形である。これらの図より、 m, l が大きくなる
- 25

につれて結合フラクタル図形が y 軸方向に伸び（ y 軸方向の成長が促進されている）、 m 、 l が小さくなるにつれて結合フラクタル図形が x 軸方向に伸びる（ y 軸方向の成長が抑制されている）傾向があることが分かる。さらにこれらの構造変化により、異なるフラクタル図形間の隣接している点の数が増えていることが分かる。具体的には、第 15 図、第 16 図および第 17 図に示す図形においては二つのフラクタル図形間で隣接している点は存在しないが、第 18 図では隣接点が 6 個、第 19 図では 57 個、第 20 図では 95 個というふうに徐々に増加している。このように、異方性パラメータを変化させることによって、複数のフラクタル図形間の結合状態を変化させることができる。また、 $m = 0.5$ 、 $l = 2.0$ と異なる値として成長させたときの図形が第 21 図である。これより、 ϕ に導入した異方性パラメータ l の影響が ϕ に導入した異方性パラメータ m の影響よりも大きいことが分かる。結合強度が変化することからも容易に分かるように、このモデルによる方法は単なる空間伸縮ではなく、本質的に新しく導入された成長アルゴリズムの異方性により、改良されたものである。

（５）三次元空間における異方性を導入した、拡張された、相互作用しながら成長するフラクタルス

以下に、上記（４）のモデルを発展させ、三次元空間における異方性を導入した拡張された、相互作用しながら成長するフラクタルス、すなわち結合フラクタルネットワークを導入する。三次元空間の正方格子 S 上に、 N 個の種からなるフラクタルスを考える。このとき、 S を異方的な場と考え、異方性パラメータテンソル

$$M = (m_{\mu,\nu}), L = (l_{\mu,\nu})$$

を導入する。格子点 $(i, j, k) \in S$ 上にスカラーポテンシャル場 $\phi_M(i, j, k)$ を定義し、これを電位と称する。また、

$\psi_L^{(1)}(i, j, k), \psi_L^{(2)}(i, j, k), \dots, \psi_L^{(N_c)}(i, j, k)$ を定義する。これらは次の微分方程式を満たす。

$$\sum_{\mu, \nu=x, y, z} \frac{\partial}{\partial r_\mu} \frac{1}{m_{\mu, \nu}} \frac{\partial}{\partial r_\nu} \phi_M(i, j, k) = 0 \quad (79)$$

$$\sum_{\mu, \nu=x, y, z} \frac{\partial}{\partial r_\mu} \frac{1}{l_{\mu, \nu}} \frac{\partial}{\partial r_\nu} \psi_L^{(1)}(i, j, k) = 0 \quad (80)$$

$$\sum_{\mu, \nu=x, y, z} \frac{\partial}{\partial r_\mu} \frac{1}{l_{\mu, \nu}} \frac{\partial}{\partial r_\nu} \psi_L^{(2)}(i, j, k) = 0 \quad (81)$$

$$\vdots$$

$$\sum_{\mu, \nu=x, y, z} \frac{\partial}{\partial r_\mu} \frac{1}{l_{\mu, \nu}} \frac{\partial}{\partial r_\nu} \psi_L^{(N_c)}(i, j, k) = 0 \quad (82)$$

ここで、 $\frac{\partial}{\partial r_\mu}$ は格子点上の差分を表し、例えば

$$\frac{\partial \phi_M(i, j, k)}{\partial r_x} = \frac{\phi_M(i+1, j, k) - \phi_M(i, j, k)}{(i+1) - i} \quad (83)$$

である。これから定義する図形 T_n は三次元格子上的格子点の集合であり、その各格子点は N_c 個の種に分類されている。すなわち、

$$T_n = \bigcup_{p=1}^{N_c} Q_n^{(p)} \quad (84)$$

であり、各種は互いに排他的である。つまり、

$$Q_n^{(p)} \cap Q_n^{(q)} = \emptyset, \quad \text{if } p \neq q. \quad (85)$$

である。

$Q_0^{(p)}$ は単一の格子点 $(i_{\text{ini}}^{(p)}, j_{\text{ini}}^{(p)}, k_{\text{ini}}^{(p)})$ のみからなり、 T_{n+1} は順次、以下に与えるルールにより、 T_n に一格子点を付け加えることにより生成される。まず、

5

$$\phi_M(i, j, k) = 0 \quad \text{when} \quad (i, j, k) \longrightarrow \infty \quad (86)$$

$$\phi_M(i, j, k) = 1 \quad \text{when} \quad (i, j, k) \in T_n \quad (87)$$

10 の境界条件のもとで方程式(79)を解き、各格子点の電位を決定する。
また、

$$\psi_L^{(p)}(i, j, k) = \psi_\infty \quad \text{when} \quad (i, j, k) \longrightarrow \infty \quad (88)$$

15

$$\psi_L^{(p)}(i, j, k) = 1 \quad \text{when} \quad (i, j, k) \in Q_n^{(p)} \quad (89)$$

$$\psi_L^{(p)}(i, j, k) = -1 \quad \text{when} \quad (i, j, k) \in Q_n^{(q)} \quad (p \neq q) \quad (90)$$

20 の境界条件のもとで方程式(80)～(82)を解き、 $\psi_L^{(p)}(i, j, k)$ を決定する。 T_{n+1} を構成するために T_n に付け加えられるべき格子点は、 T_n に含まれず、 $Q_n^{(p)}$ に最近接する格子点の集合 $U_n^{(p)}$ から選ばれる。

$U_n^{(p)}$ に含まれる格子点の数を $N_n^{(p)}$ と書く。つまり、 T_n に付け加えられるべき格子点は、以下の集合

25

$$U_n = \bigcup_{p=1}^{N_c} U_n^{(p)} \quad (91)$$

から選ばれ、その集合に含まれる格子点の数、つまり候補者数は

$$N_n = \sum_{p=1}^{N_c} N_n^{(p)} \quad (92)$$

5

である。

さて、 $U_n^{(p)}$ に含まれる各点

$$(i_m^{(p)}, j_m^{(p)}, k_m^{(p)}) \quad (m = 1, 2, \dots, N_n^{(p)})$$

に対し、その電界強度を

10

$$E_m^{(p)}(\alpha, \beta, M, L) = |\phi_M(i_m^{(p)}, j_m^{(p)}, k_m^{(p)}) - 1|^\alpha \times |\psi_L(i_m^{(p)}, j_m^{(p)}, k_m^{(p)}) - 1|^\beta$$

(93)

のように定義する。

15 U_n のある点 $(i_m^{(p)}, j_m^{(p)}, k_m^{(p)})$ が選ばれる確率は、その電界強度 $E_m^{(p)}(\alpha, \beta, M, L)$ に比例する。つまり、その確率は、

$$P_m^{(p)}(\alpha, \beta, M, L) = \frac{1}{\Delta} E_m^{(p)}(\alpha, \beta, M, L) \quad (94)$$

20

$$\Delta = \sum_{p=1}^{N_c} \sum_{m=1}^{N_n^{(p)}} E_m^{(p)}(\alpha, \beta, M, L) \quad (95)$$

である。以上の操作を繰り返すことで T_n を構成して行く。

上記 (5) のモデルに基づく神経回路網の形成方法の具体例について説明する。以下に、三次元格子上のシミュレーション結果を示す。

25 三次元格子上で異方性を z 軸方向のみに導入、つまり

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & m \end{pmatrix}, \quad L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & l \end{pmatrix} \quad (96)$$

5 とし、 $(\alpha, \beta) = (0.4, 0.8)$ 、 $\psi_{\infty} = 0$ とパラメータを固定して $x y$ 平面内にある三点から 5 0 0 0 ステップ成長させた。 $m = 1 = 0.02$ 、 $m = 1 = 0.1$ 、 $m = 1 = 1.0$ 、 $m = 1 = 2.0$ 、 $m = 1 = 10.0$ の各場合における結合フラクタル図形を第 22 図～第 26 図に示す。また、 z 軸方向分布の標準偏差 s を第 27 図に示す。第 27 図において、横軸は $m = 1 = x$ の値である。これらの図より、三次元格子状において、異方性を入れた方向の分布を制御することが可能であることが分かる。すなわち、 $m = 1 = x$ の値を小さくすることにより、 z 軸方向への成長を抑制することができ、逆に $m = 1 = x$ の値を大きくすることにより、 z 軸方向への成長を促進することができる。ここで、異なるフラクタル図形間の隣接している点の数が概ね制御できることを見る。第 22 図～第 26 図と同じ状況、すなわち $m = 1 = 0.02$ 、 $m = 1 = 0.1$ 、 $m = 1 = 1.0$ 、 $m = 1 = 2.0$ 、 $m = 1 = 10.0$ に対して成長ステップを横軸として、隣接点の数 N をプロットしたのが第 28 図である。この図より、パラメータ m 、 l の減少に伴い、つまり、成長点が起点を定義した $x y$ 面内に伸びて行くに従って、結合の数が増加していくことが分かる。

なお、上述の神経回路網形成のシミュレーションプログラムは、コンピュータ読み取り可能な記録媒体として提供することもできる。

(6) 結合フラクタルネットワークにおける統計相互作用

25 さて、ランダムな過程を経て形成された構造またはその構造を用いて行われた処理には、そのランダムな過程によりゆらぎが生じるのは

当然のことである。我々の脳における情報処理でも、同じことが言えるであろう。しかしながら、近年の統計物理学の発展とともに明らかとなってきたことによると、そのようなランダム系において、その統計分布を平均して初めて現れる現象または普遍的性質が存在する。

- 5 結合フラクタルネットワークでは、成長過程での乱数列を変化させると、形成されるネットワークの形状そのものは変化してしまうが、その違いに依存しない普遍的性質が存在すると思われる。その一つがその統計分布により定義される統計相互作用である。ここでは、その性質を明らかにする。

- 10 結合フラクタルネットワークの成長は (α, β) という二つのパラメータにより特徴付けられるが、実際の成長実験ではランダム変数により、様々なネットワークが形成される。そのランダム変数による違いに左右されない普遍的性質を考える。

- 15 以下で行うシミュレーションでは、 201×201 の二次元正方格子子上において $N_0 = 2$ の成長を行った。 $Q_0^{(1)}$ の元である一つ目の起点は $(185, 100)$ であり、 $Q_0^{(2)}$ の元である二つ目の起点は $(117, 100)$ である。 $n = 800$ ステップの成長に関し、 $M = 300$ の異なる乱数列に対して成長シミュレーションを行った。

- 20 シミュレーション結果の例を第29図～第34図に示す。ここで、第29図では $(\alpha, \beta) = (0.4, 0.6)$ 、第30図では $(\alpha, \beta) = (0.8, 0.6)$ 、第31図では $(\alpha, \beta) = (1.2, 0.6)$ 、第32図では $(\alpha, \beta) = (0.4, 1)$ 、第33図では $(\alpha, \beta) = (0.8, 1)$ 、第34図では $(\alpha, \beta) = (1.2, 1)$ を用いた。それぞれの図には四例の結合フラクタルネットワークが示されている。これは同じ (α, β) を用いつつ、異なる乱数列を用いて成長させたものである。各四例は、相
25 異なる結合フラクタルネットワークの構造であるが、一方で四例に共

通の性質、つまり (α, β) により規定される性質が存在する。ひとは、各要素フラクタルのフラクタル性であって、これは相互作用によらない。ここで議論するのは、要素フラクタル間の相互作用に関するものである。

- 5 要素フラクタル間の相互作用は、異なる乱数列を用いて行われた複数の成長に関する統計平均を用いて初めて定義できるものである。なぜならば、単一の成長シミュレーション結果において、要素フラクタル間の関係が相互作用により規定されているのか、それともそれぞれ独立に形成されたのかを判別する方法が存在しないからである。従って、以下で議論する、多数の成長シミュレーションの統計平均において発現する要素フラクタル間の相互作用を、統計相互作用と呼ぶ。

さて、 $M = 300$ の成長を行ったが、そのそれぞれを p の添字で区別し、 $T_n(p)$, $p = 1, 2, \dots, M$ と書くことにする。それぞれの結合フラクタルネットワークの要素 $Q_n^{(k)}(p)$ により、

15

$$T_n(p) = \bigcup_{k=1}^{N_c} Q_n^{(k)}(p) \quad (101)$$

- と書ける。 $Q_n^{(k)}(p)$ の元の数、つまり p 番目の成長シミュレーションにおける k 番目の種が、 n ステップにより成長されているサイト数を $M_{n,k,p}$ と書くことにする。 $Q_n^{(k)}(p)$ の重心座標を以下に導入しよう。

20

$$w_n^{(k)}(p) = \frac{1}{M_{n,k,p}} \sum_{r \in Q_n^{(k)}(p)} r \quad (102)$$

この k 番目の種の重心座標のサンプル平均が

25

$$w_n^{(k)} = \frac{1}{M} \sum_{p=1}^M w_n^{(k)}(p) \quad (103)$$

であり、この重心期待値間の距離

$$R_n^{(k,l)} = |w_n^{(k)} - w_n^{(l)}| \quad (104)$$

5

は便利な量である。そして、統計相互作用の解析を行うために、相関関数を導入する。それは、

$$G_n^{(k,l)} = \frac{1}{M} \sum_{p=1}^M x_n^{(k)}(p) \cdot x_n^{(l)}(p) \quad (105)$$

10

ただし、

$$x_n^{(k)}(p) = \frac{1}{M_{n,k,p}} \sum_{r \in Q_n^{(k)}(p)} (r - w_n^{(k)}) \quad (106)$$

15 である。ここで解析するのは $N_c = 2$ の場合であり、特に、一番目の種と二番目の種の重心間距離の期待値

$$D(n) = R_n^{(1,2)} \quad (107)$$

20 と、一番目の種と二番目の種の相関強度として無次元の量

$$\chi(n) = \frac{G_n^{(1,2)}}{\sqrt{G_n^{(1,1)} G_n^{(2,2)}}} \quad (108)$$

を計算する。重心間距離を、 $\beta = 0.6$ の場合に関して第 35 図に、
25 $\beta = 0.8$ の場合に関して第 36 図に、 $\beta = 1$ の場合に関して第 37 図に示した。それぞれ、 α の増加とともに、重心間距離が増加してい

るのが分かる。つまり、重心間距離が常に増加しているのだから、結合フラクタルネットワークは外に向かって成長していることになる。

このような場合は、典型的な斥力相互作用が働いていると考えることができる。一方、 $D(n)$ が n とともに減少して行く場合は、凝集したネットワークが形成されることになる。このような場合は、強い引力的相互作用が働いていると考えることができる。

5 相関強度 $\chi(n)$ を見てみよう。 $\beta = 0.6$ の場合に関して第 38 図に、 $\beta = 0.8$ の場合に関して第 39 図に、 $\beta = 1$ の場合に関して第 40 図に示した。 $n < 100$ の領域では、違いはあまり認められない。これは、それぞれ全く独立に成長が進んでいる領域であり、種間の統計相互作用はその形状に影響を与えない。 $100 < n < 200$ の領域では、 $\chi(n)$ は 0.2 程度のほぼ一定の値を保つ。その後 $n > 200$ の領域において、 (α, β) に依存した種間の統計相互作用の効果を表している。 α の増加とともに、 χ が減少して行くことが分かる。これは、 $\chi(n)$ の物理的解釈を与えることにより分かりやすくなる。例えば、種 1 がより左側によったとしよう。そのとき、種 2 も左側に引かれたならば、 $\chi(n) > 0$ となる。つまり、 $\chi(n)$ が正で大きな値ならば、種 2 は種 1 からの引力に引かれて追いかけて行くことになる。一方、 $\chi(n) < 0$ ならば、種 2 は逆方向へ成長が進むことになり、斥力的ということになる。従って、 α の増加とともに、引力が弱まって行くという解釈が、統計的な意味で定量的に正しいことが結論された。 β の違いによっても、この統計相互作用が影響を受けていることが分かる。第 40 図では、 $\alpha = 0.2$ から $\alpha = 1.2$ に対する χ の変化幅は大きいが、 β の減少に伴い、その変化幅が減少していつている。結合フラクタルネットワークの成長モデルでは、 β は接着物質の吸着確率を制御していた。 β が減少すると接着物質の場所

依存性が減少し、他の種の形成されている位置による影響が減少するものと考えられる。

- 5 以上を要約すると、結合フラクタルネットワークにおいて、複数の成長実験のアンサンブル平均により要素フラクタル間の統計相互作用が定義され、この統計相互作用によってネットワークの普遍的性質が制御される。

以上、この発明の実施形態につき具体的に説明したが、この発明は上述の実施形態に限定されるものではなく、この発明の技術的思想に基づく各種の変形が可能である。

- 10 以上説明したように、この発明によれば、複数の起点からフラクタル構造をそれぞれ成長させ、それぞれの起点から成長するフラクタル構造を相互作用させながら成長させて互いに連結したフラクタル構造を形成するようにしていることにより、神経回路網などの複雑なネットワークを制御性良くしかも容易に構成することができる。特に、フ
15 ラクタル構造を成長させる空間が異方性を有する場合には、異なるフラクタル構造間の結合状態を制御することができ、より多彩な構造の神経回路網などの複雑なネットワークを、制御性良くしかも容易に構成することができる。

請 求 の 範 囲

1. 複数の起点からフラクタル構造をそれぞれ成長させ、それぞれの
起点から成長する上記フラクタル構造を相互作用させながら成長させ
5 て互いに連結したフラクタル構造を形成するようにした

ことを特徴とするフラクタル構造の形成方法。

2. 上記複数の起点のうちのある特定の起点からの成長速度は、遠方
から拡散過程によって材料が既成長部分に到達する確率と、それ以外
の起点から成長した部分からの拡散過程によって成長促進因子が既成
10 長部分に到達する確率とにより決定される

ことを特徴とする請求の範囲 1 記載のフラクタル構造の形成方法。

3. 上記成長速度は、遠方から拡散過程によって材料が既成長部分に
到達する確率の巾関数と、それ以外の起点から成長した部分からの拡
散過程によって成長促進因子が既成長部分に到達する確率の巾関数と
15 の積に比例する

ことを特徴とする請求の範囲 2 記載のフラクタル構造の形成方法。

4. 構造のフラクタル性または自己相似性または複雑さまたは結合の
数が概ねパラメトリックに制御可能である

ことを特徴とする請求の範囲 2 記載のフラクタル構造の形成方法。

5. 構造のフラクタル性または自己相似性または複雑さまたは結合の
数が概ねパラメトリックに制御可能である
20

ことを特徴とする請求の範囲 3 記載のフラクタル構造の形成方法。

6. 複数の起点から成長したそれぞれのフラクタル構造間の成長促進
因子の拡散を決定する相対電位を、無限遠点に対して適当に調整する
25 ことにより、構造のフラクタル性または自己相似性または複雑さまた
は結合の数を概ねパラメトリックに制御可能とした

ことを特徴とする請求の範囲 4 記載のフラクタル構造の形成方法。

7. 複数の起点から成長したそれぞれのフラクタル構造間の成長促進因子の拡散を決定する相対電位を、無限遠点に対して適当に調整することにより、構造のフラクタル性または自己相似性または複雑さまた

5 は結合の数を概ねパラメトリックに制御可能とした

ことを特徴とする請求の範囲 5 記載のフラクタル構造の形成方法。

8. 上記フラクタル構造を成長させる空間に異方性を導入する

ことを特徴とする請求の範囲 1 記載のフラクタル構造の形成方法。

9. 上記フラクタル構造を成長させる空間における上記拡散過程の拡散係数が異方性を有する

10 ことを特徴とする請求の範囲 2 記載のフラクタル構造の形成方法。

10. 構造のフラクタル性または自己相似性または複雑さまたは結合の数が概ねパラメトリックに制御可能である

ことを特徴とする請求の範囲 8 記載のフラクタル構造の形成方法。

11. 構造のフラクタル性または自己相似性または複雑さまたは結合

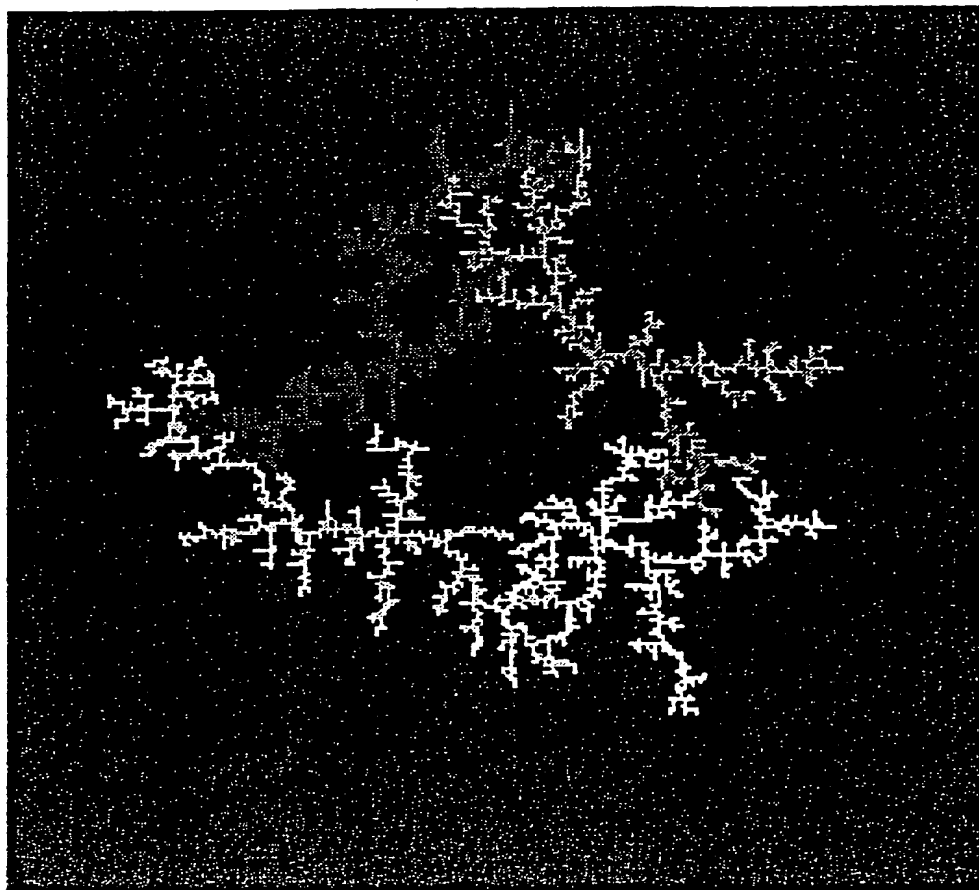
15 の数が概ねパラメトリックに制御可能である

ことを特徴とする請求の範囲 9 記載のフラクタル構造の形成方法。

THIS PAGE BLANK (USPTO)

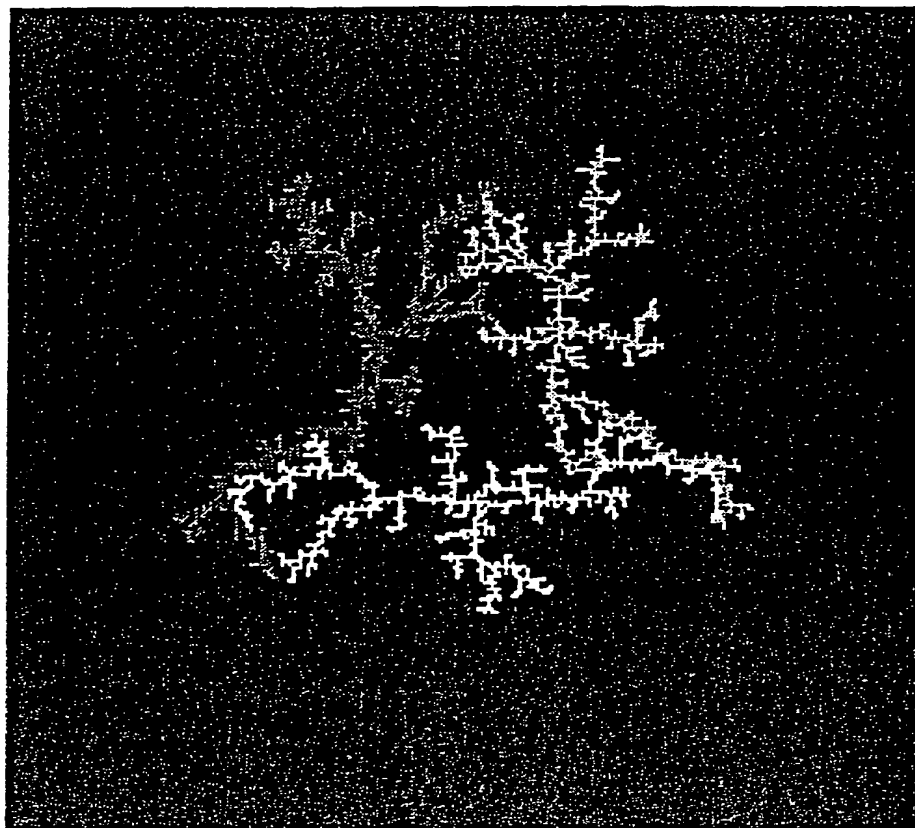
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第1図



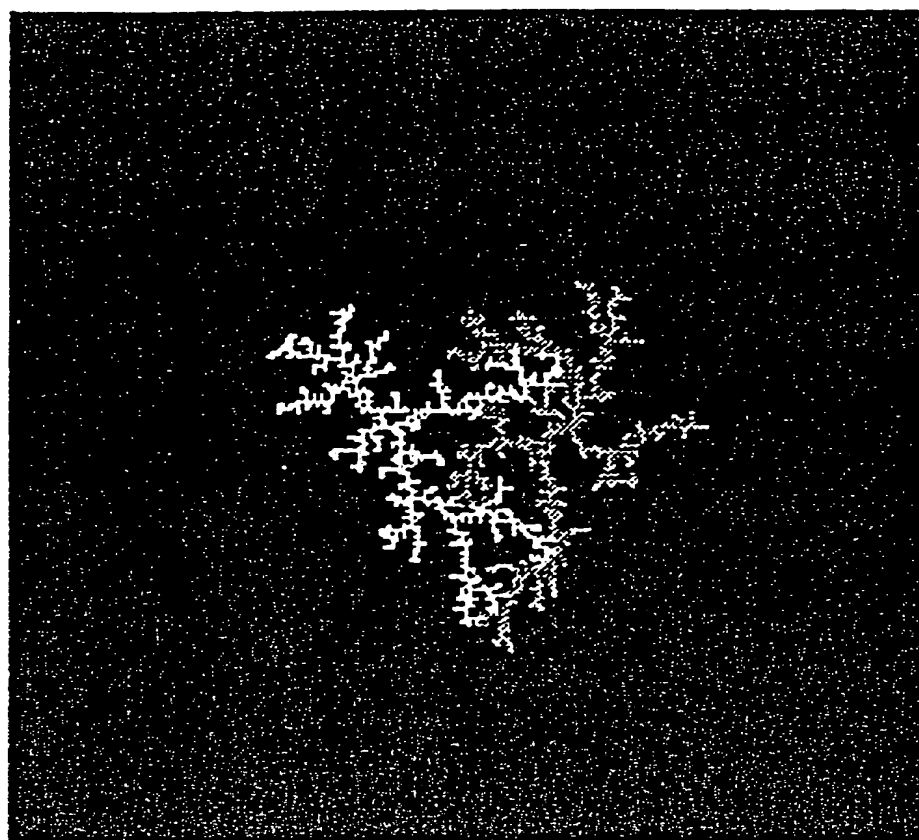
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第2図



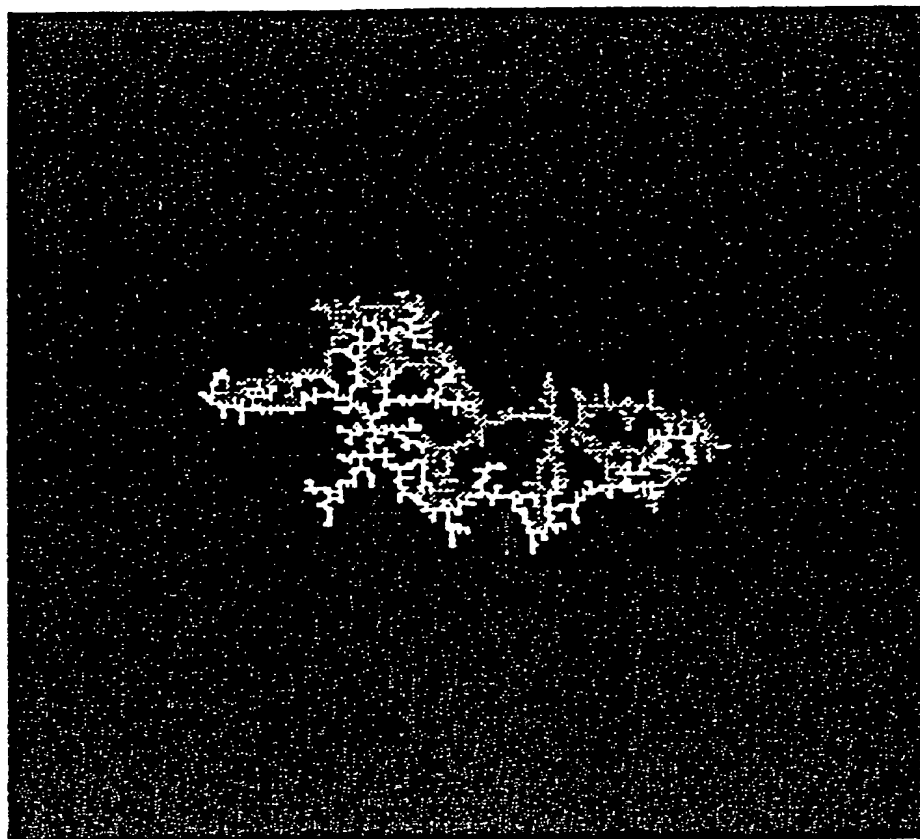
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第3図



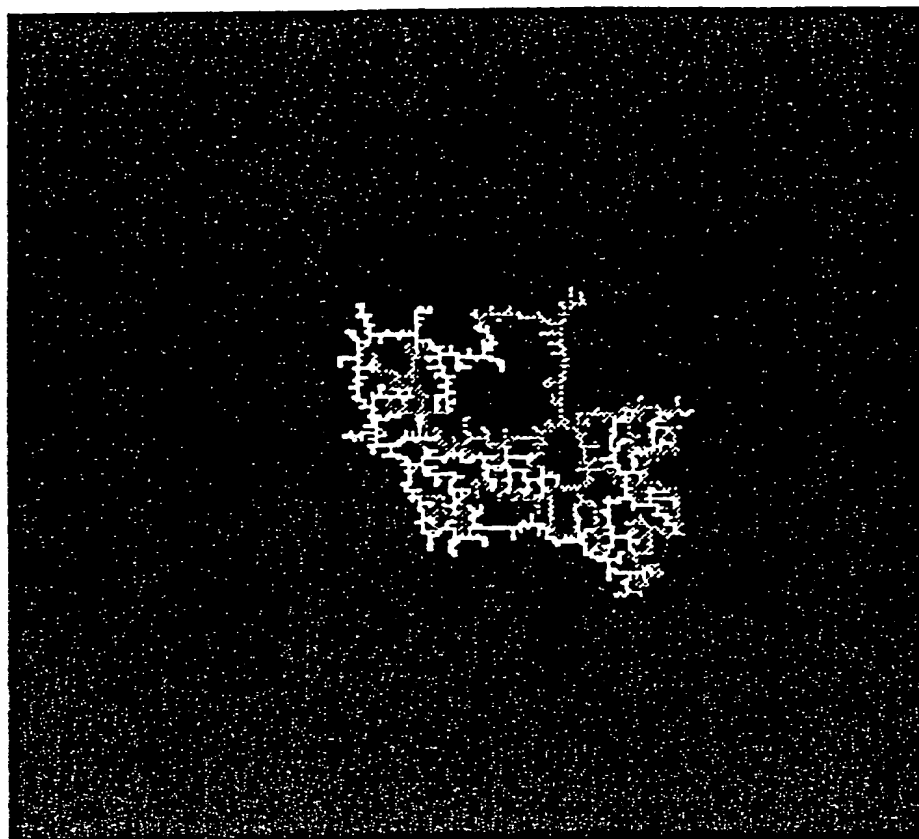
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第4図



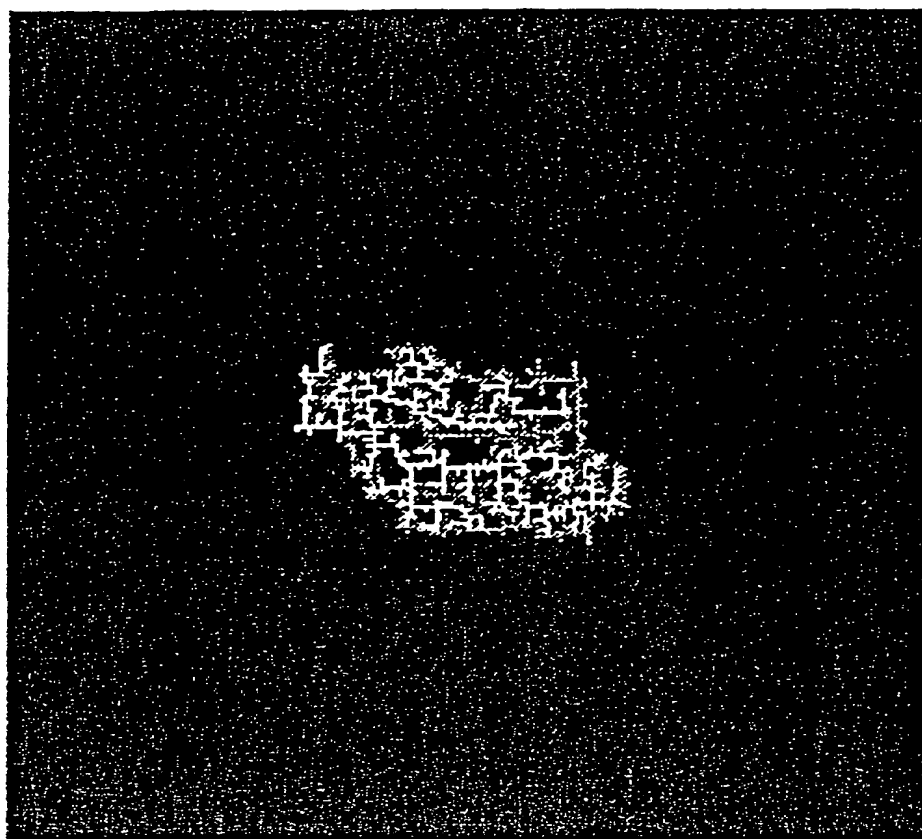
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第5図



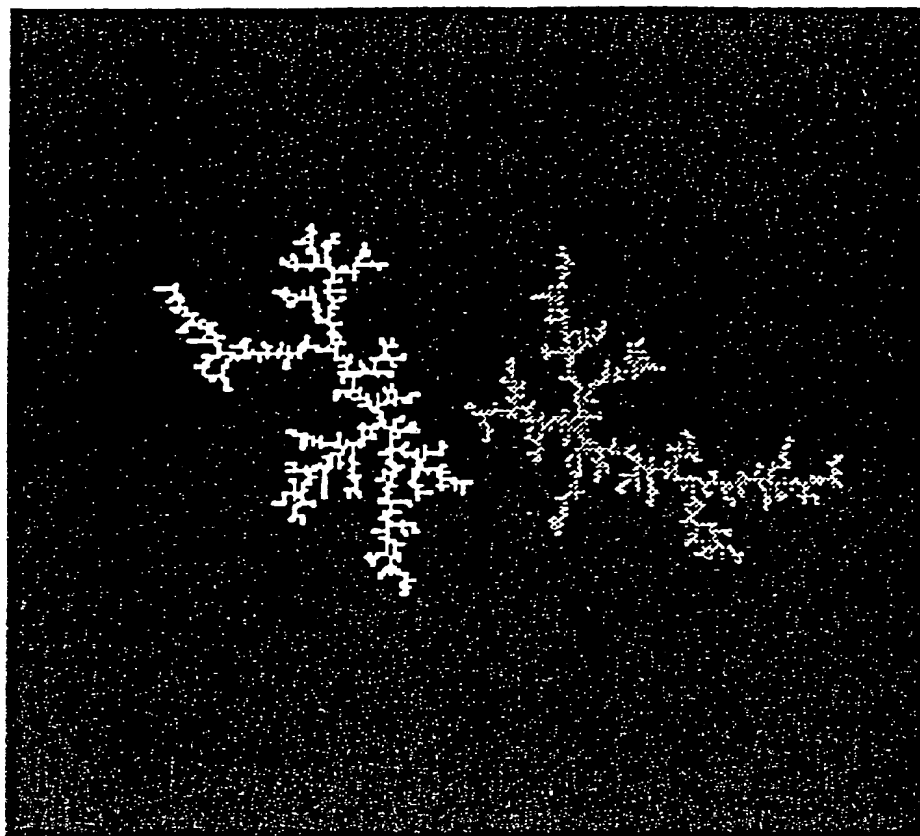
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第6図



THIS PAGE BLANK (USPTO)

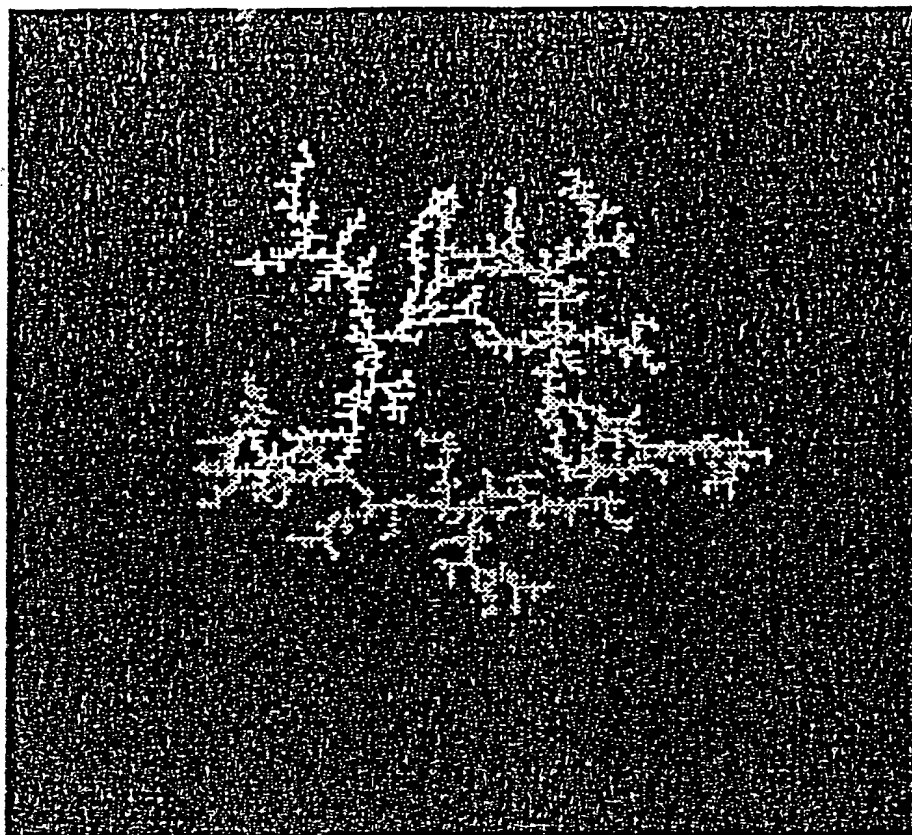
第7図



THIS PAGE BLANK (USPTO)

第8図

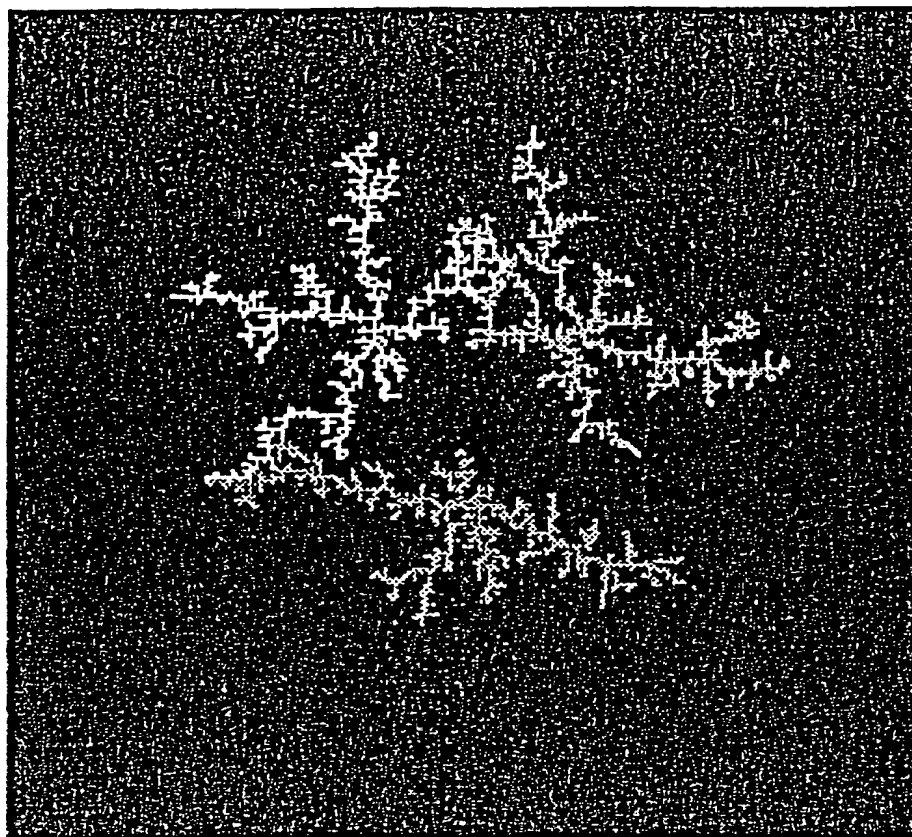
$$\psi_{\infty} = 0$$



THIS PAGE BLANK (USPTO)

第9図

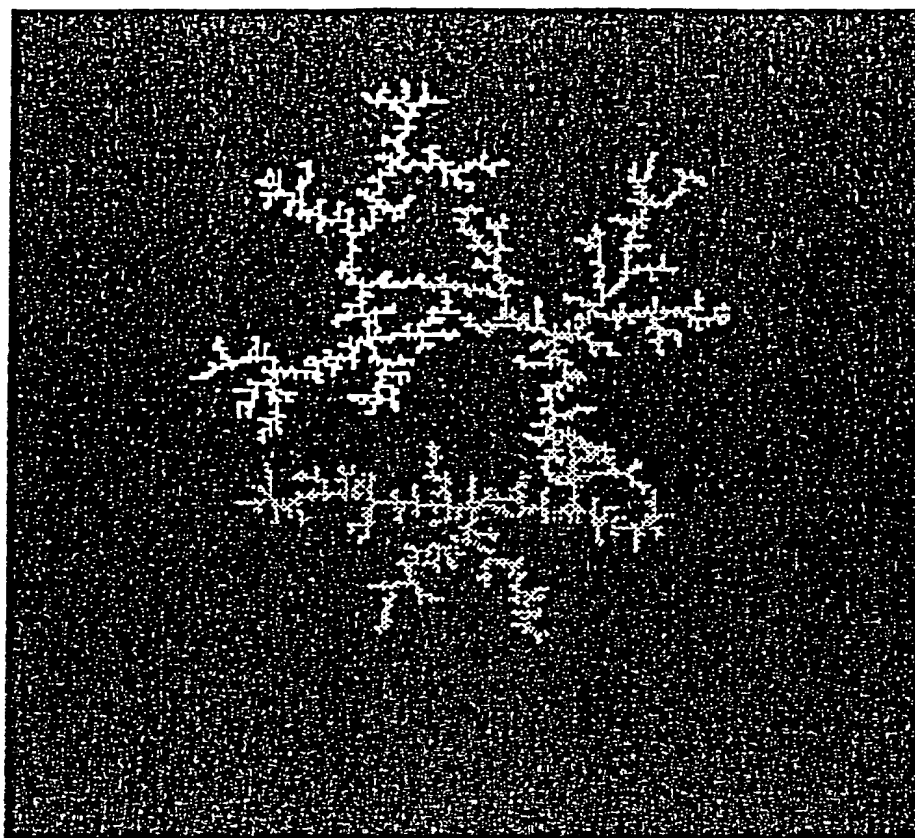
$$\psi_{\infty} = -1$$



THIS PAGE BLANK (USPTO)

第10図

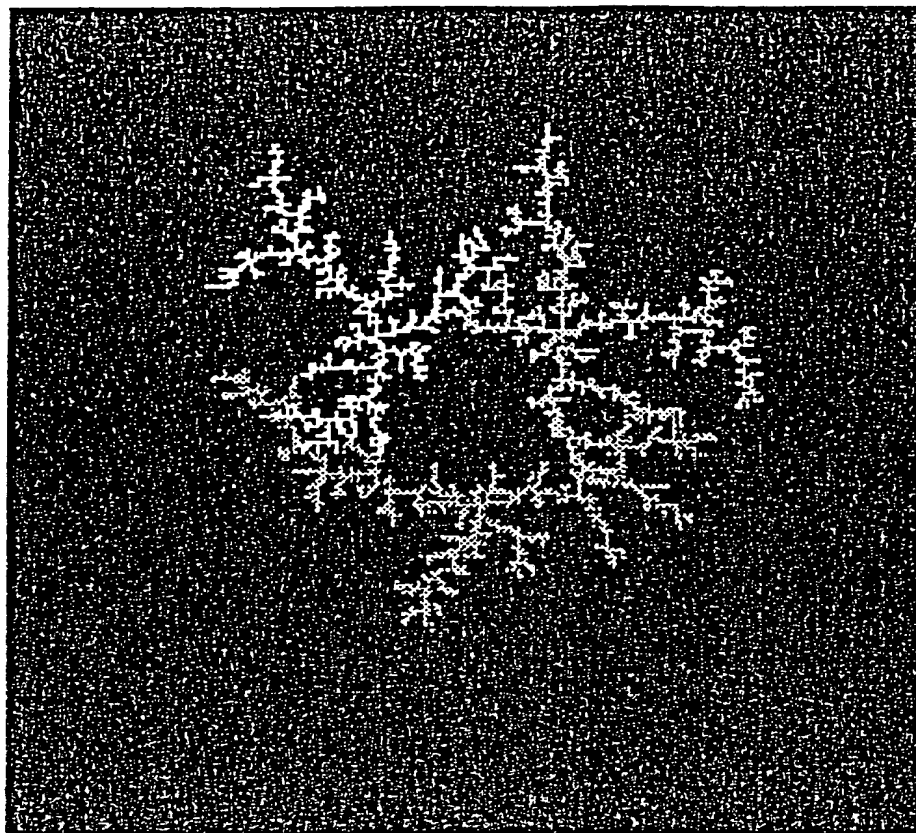
$$\psi_{\infty} = -0.6$$



THIS PAGE BLANK (USPTO)

第11図

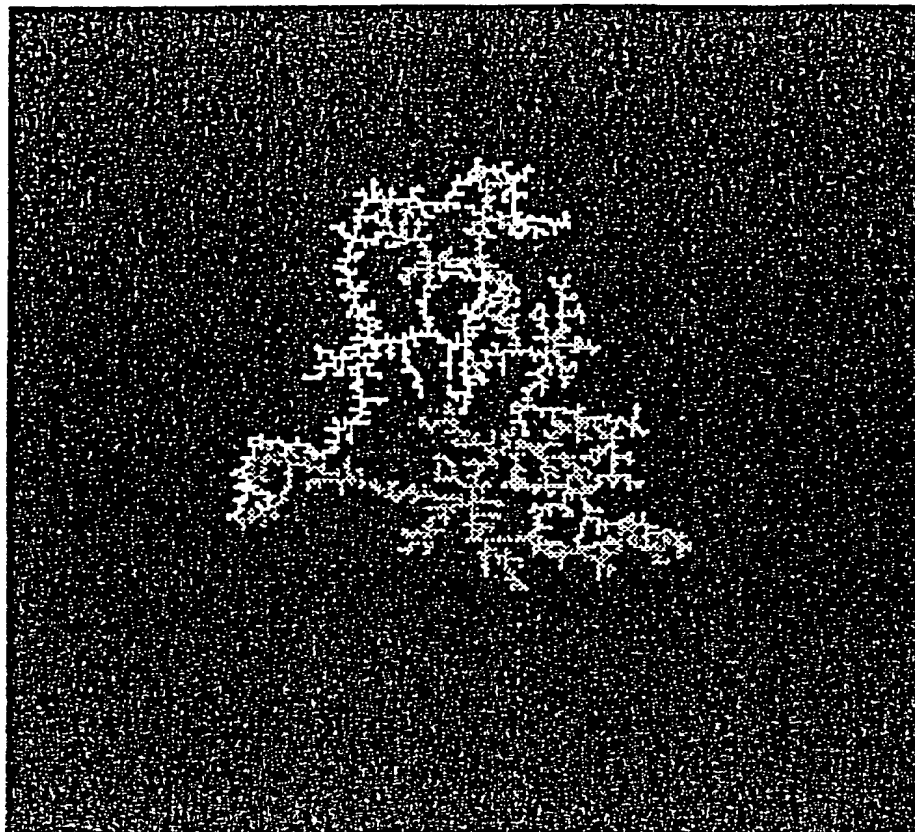
$$\psi_{\infty} = -0.2$$



THIS PAGE BLANK (USPTO)

第12図

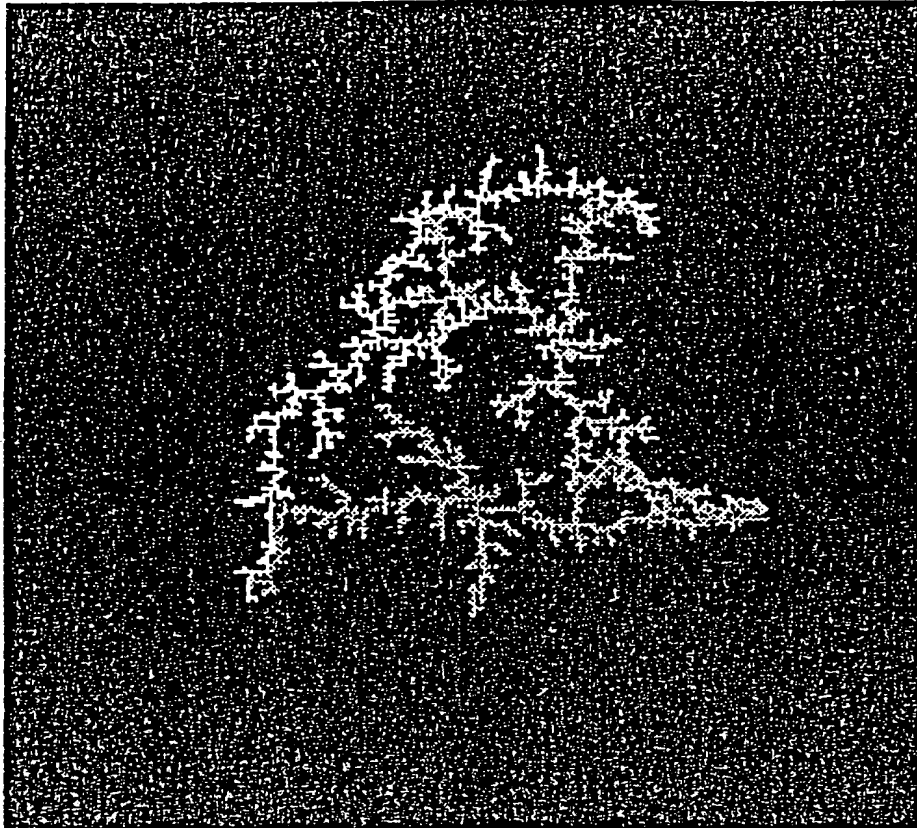
$$\psi_{\infty} = 1$$



THIS PAGE BLANK (USPTO)

第13図

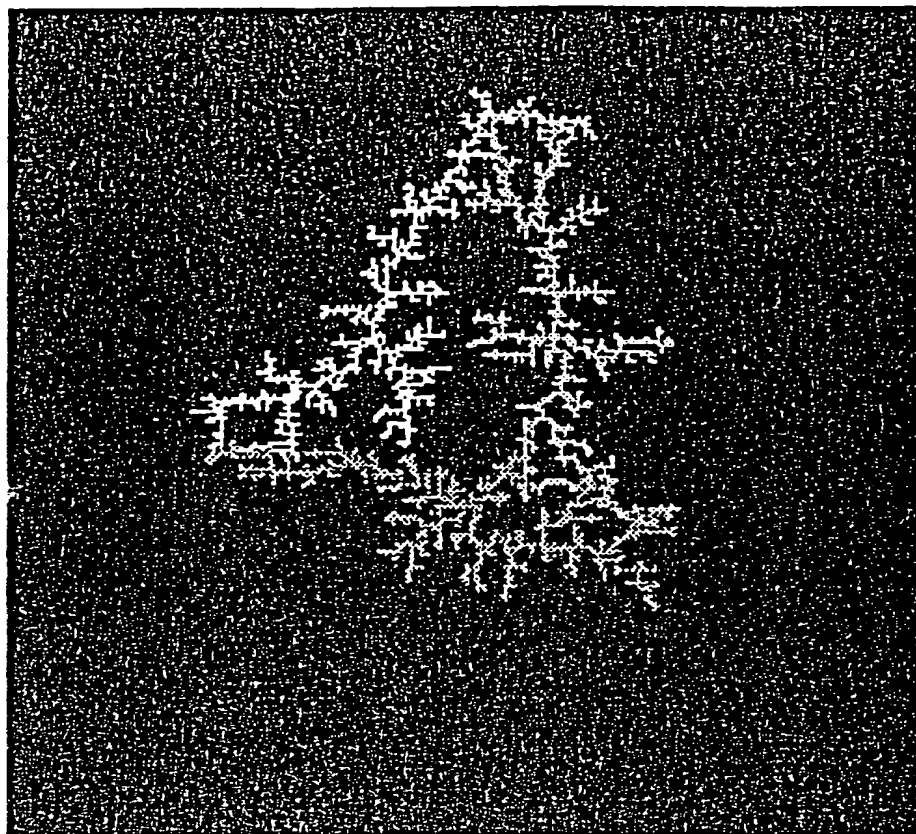
$$\psi_{\infty} = 0.6$$



THIS PAGE BLANK (USPTO)

第14図

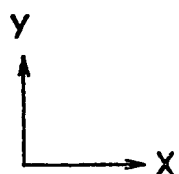
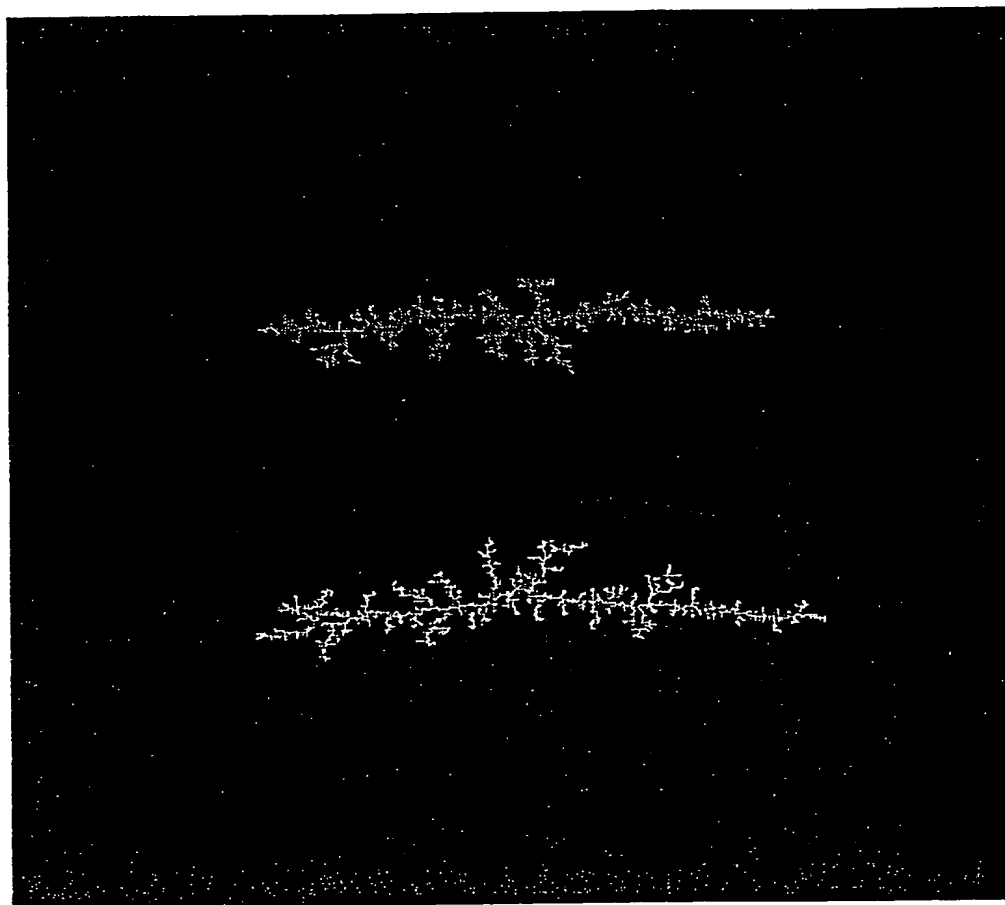
$$\psi_{\infty} = 0.2$$



THIS PAGE BLANK (USPTO)

第15図

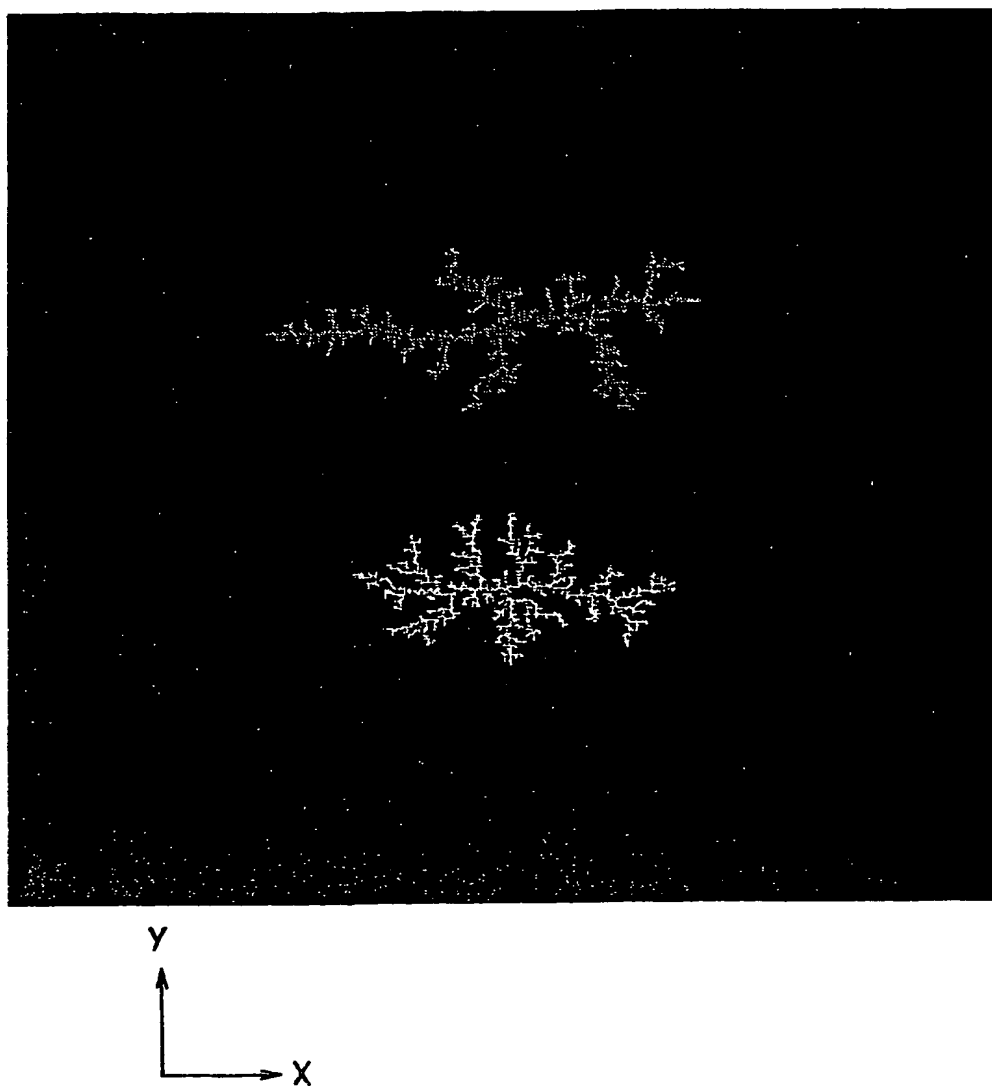
$$m = l = 0.5$$



THIS PAGE BLANK (USPTO)

第16図

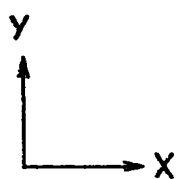
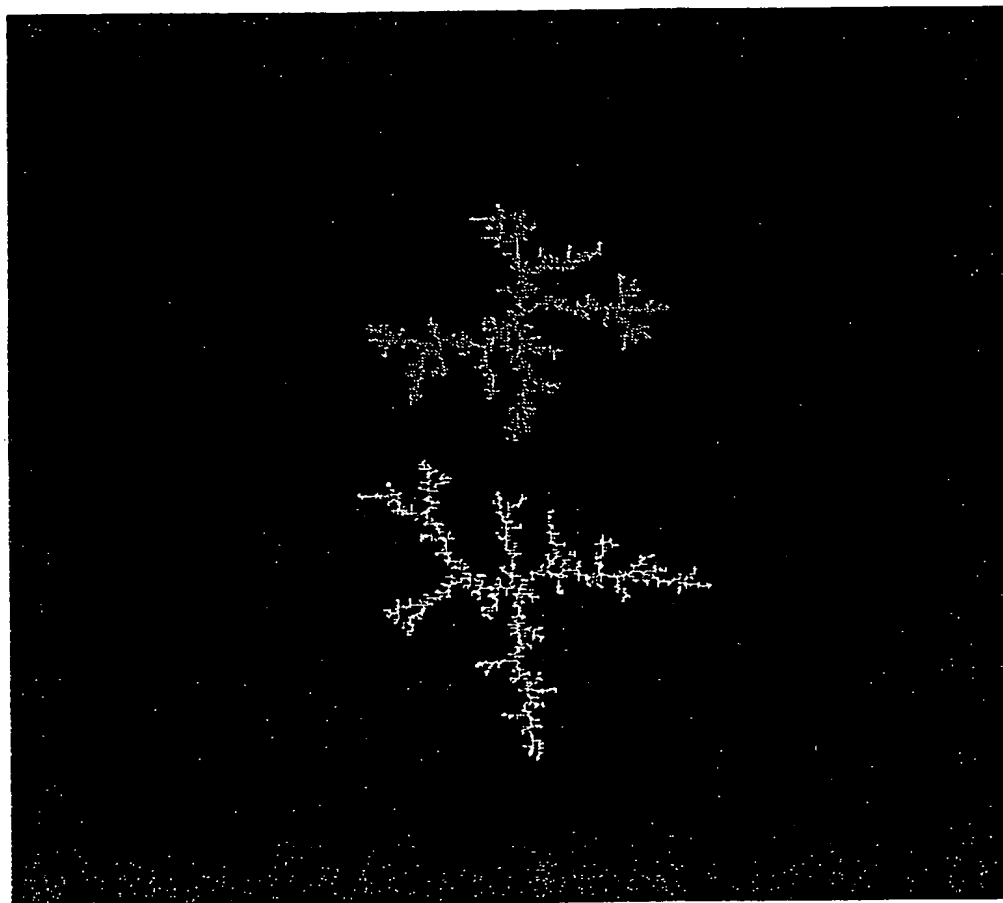
$$m = 1 = 0.75$$



THIS PAGE BLANK (USPTO)

第17図

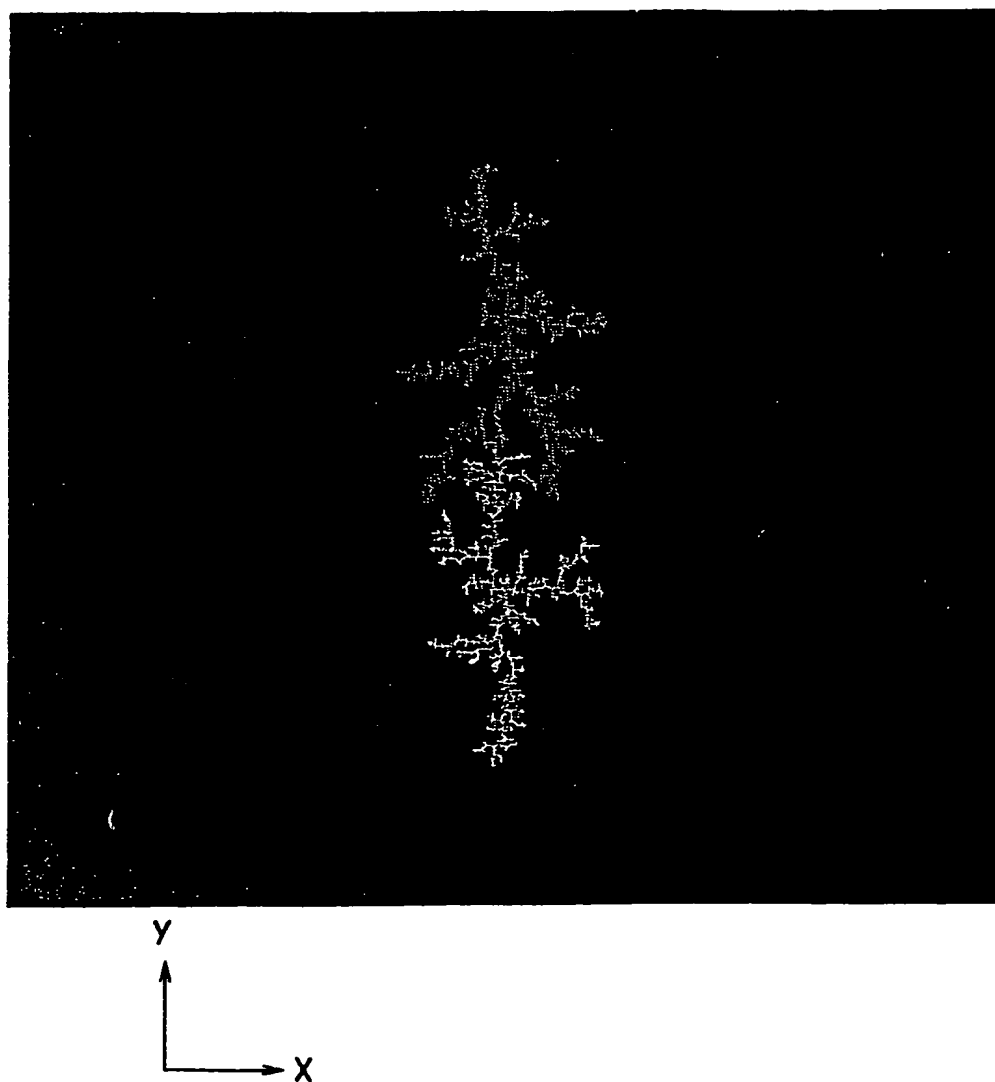
$$m = l = 1.0$$



THIS PAGE BLANK (USPTO)

第18図

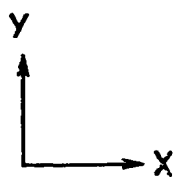
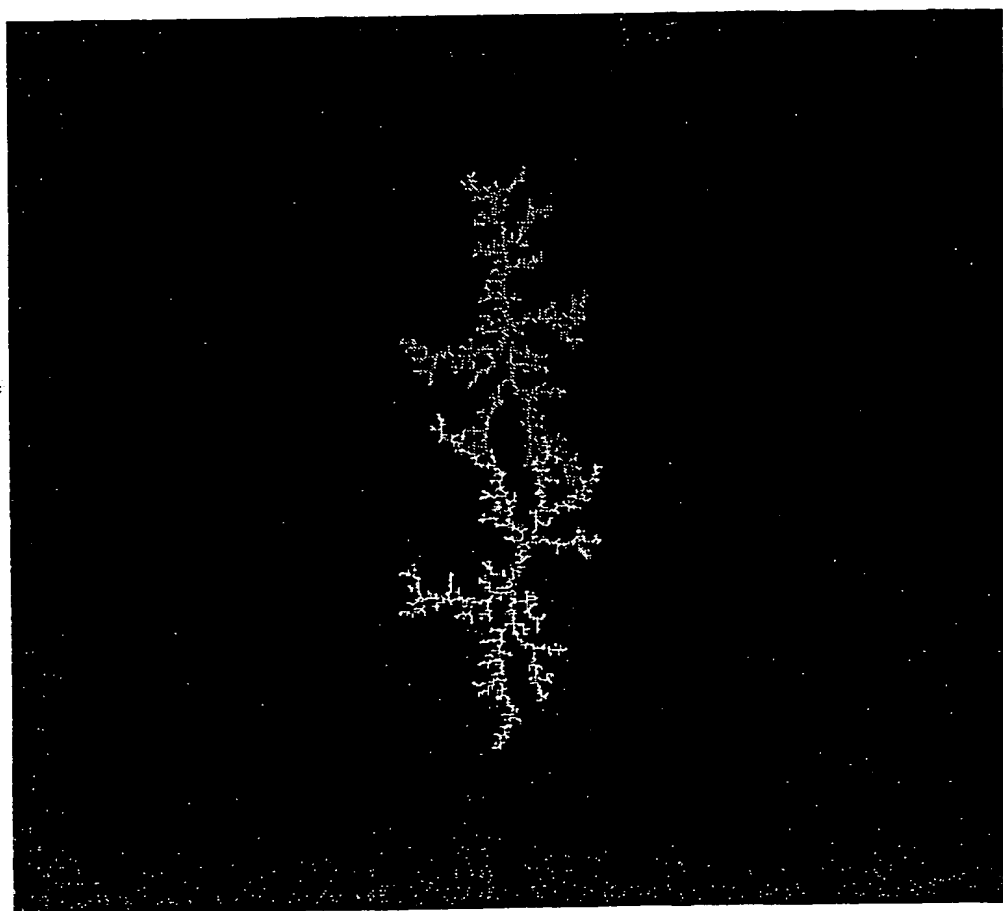
$$m = 1 = 1.25$$



THIS PAGE BLANK (USPTO)

第19図

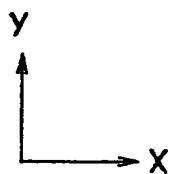
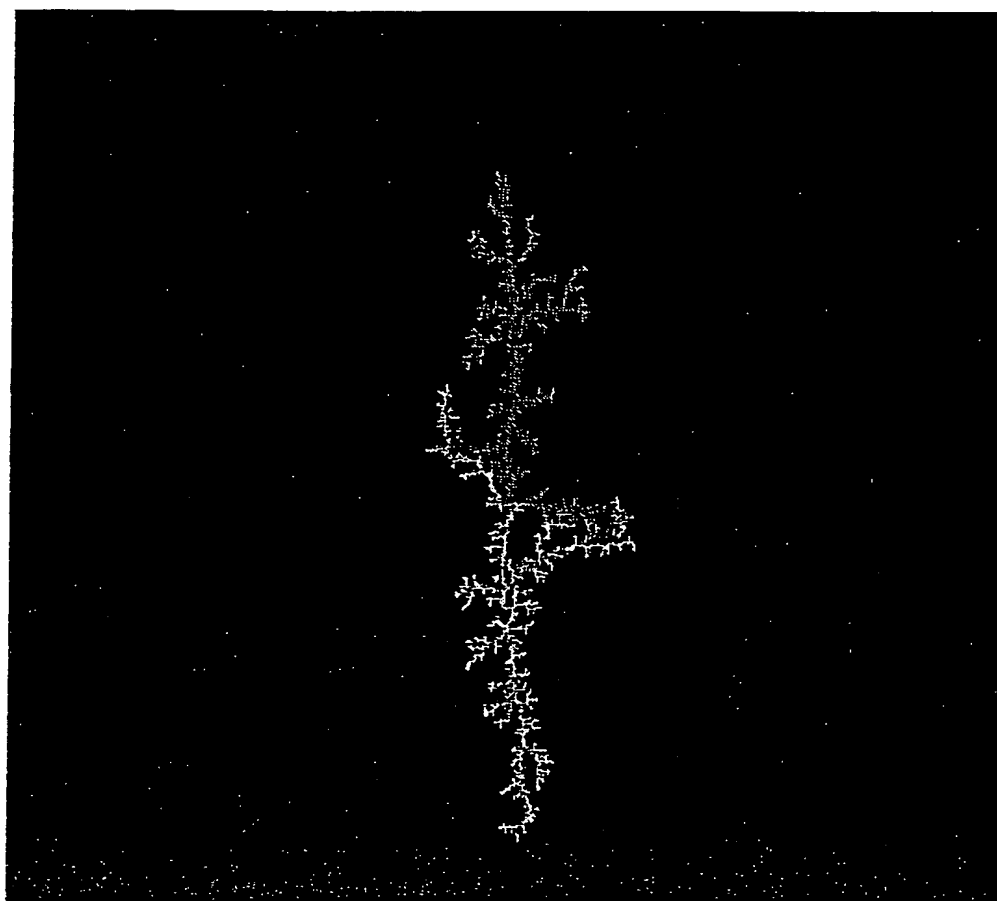
$$m = 1 = 1.5$$



THIS PAGE BLANK (USPTO)

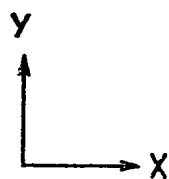
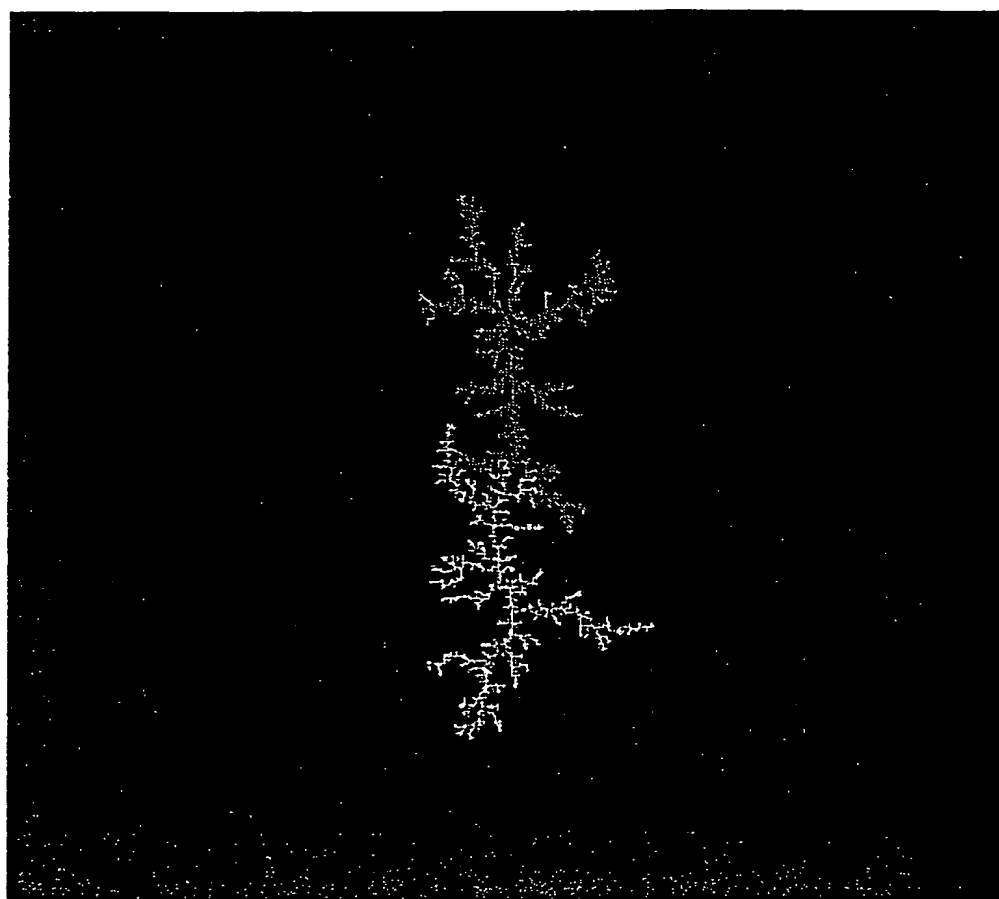
第20図

$$m = 1 = 2.0$$



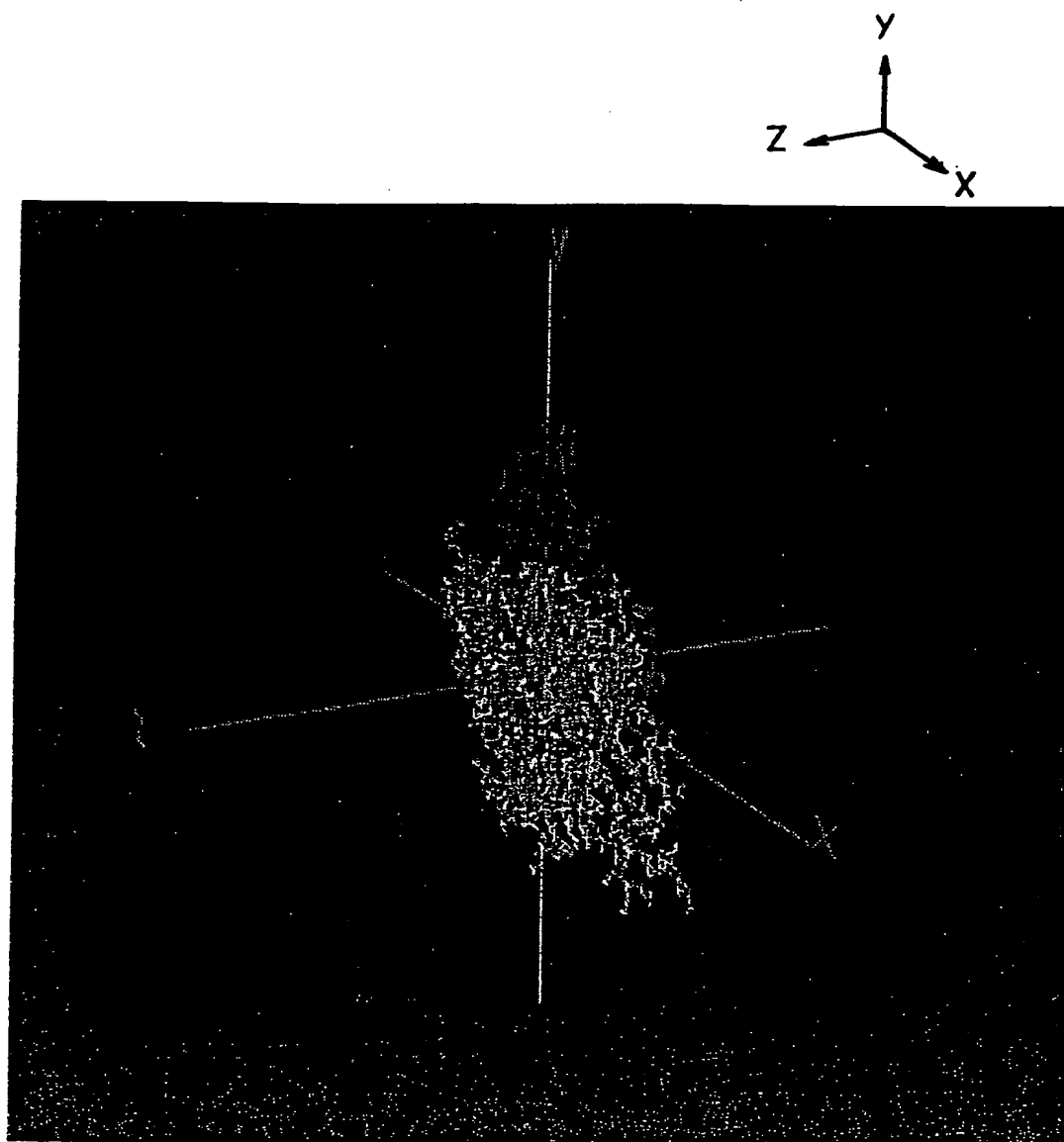
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第21図



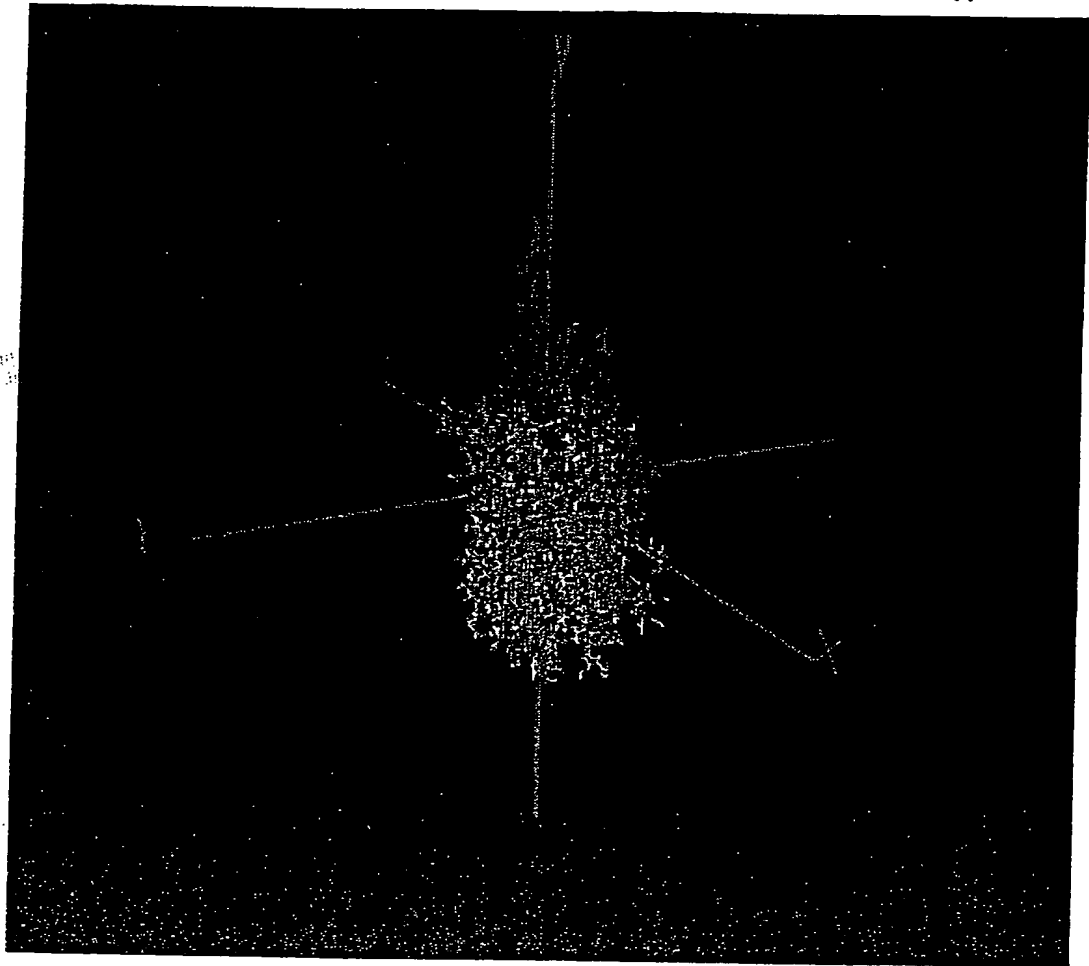
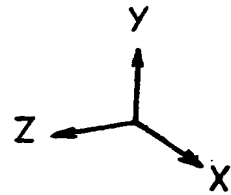
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第22図



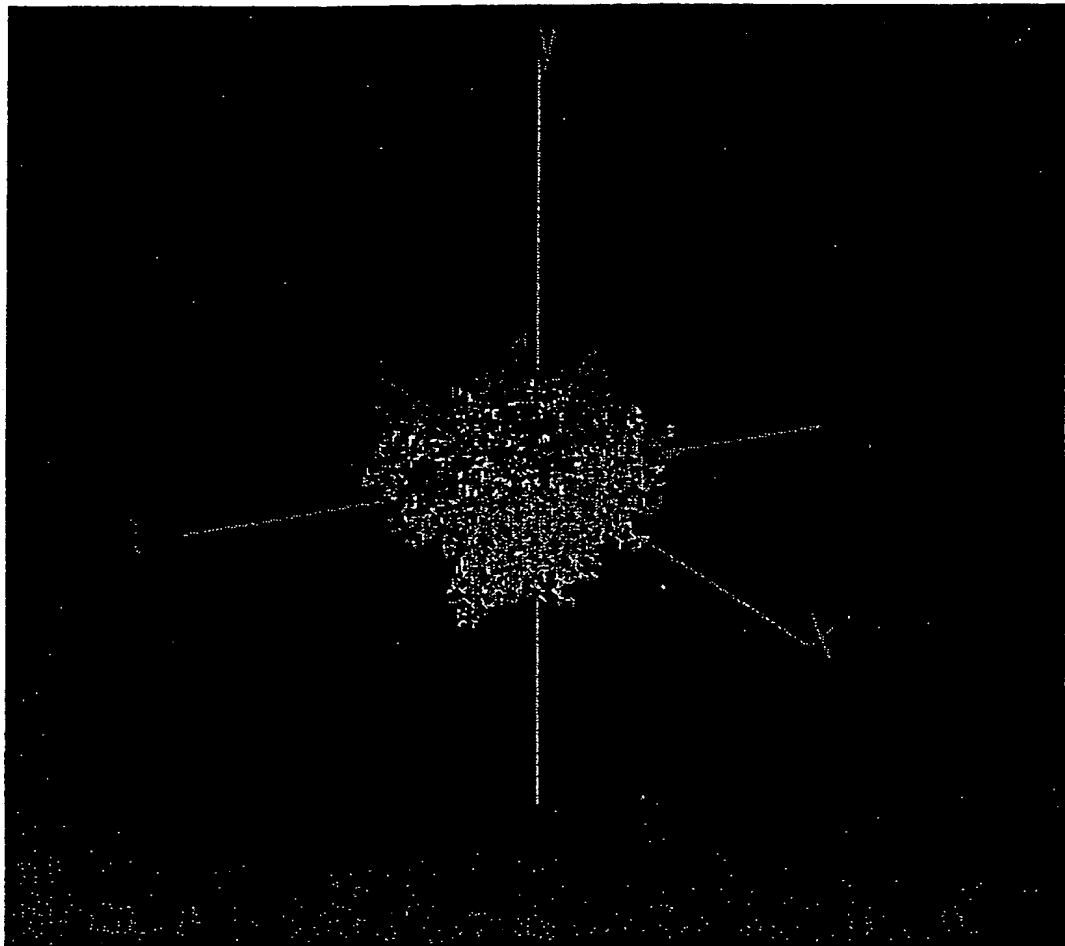
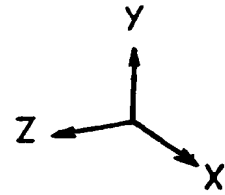
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第23図



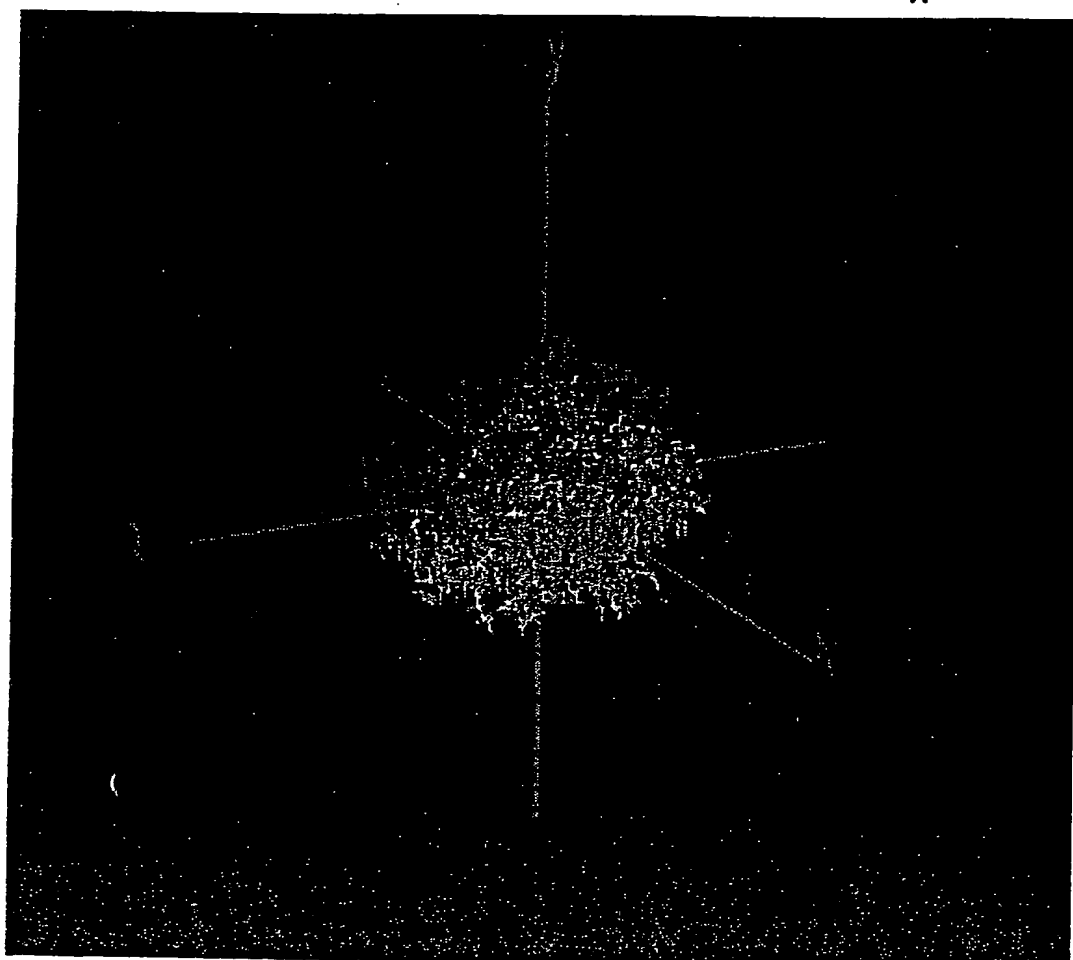
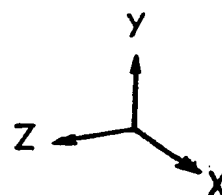
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第24図



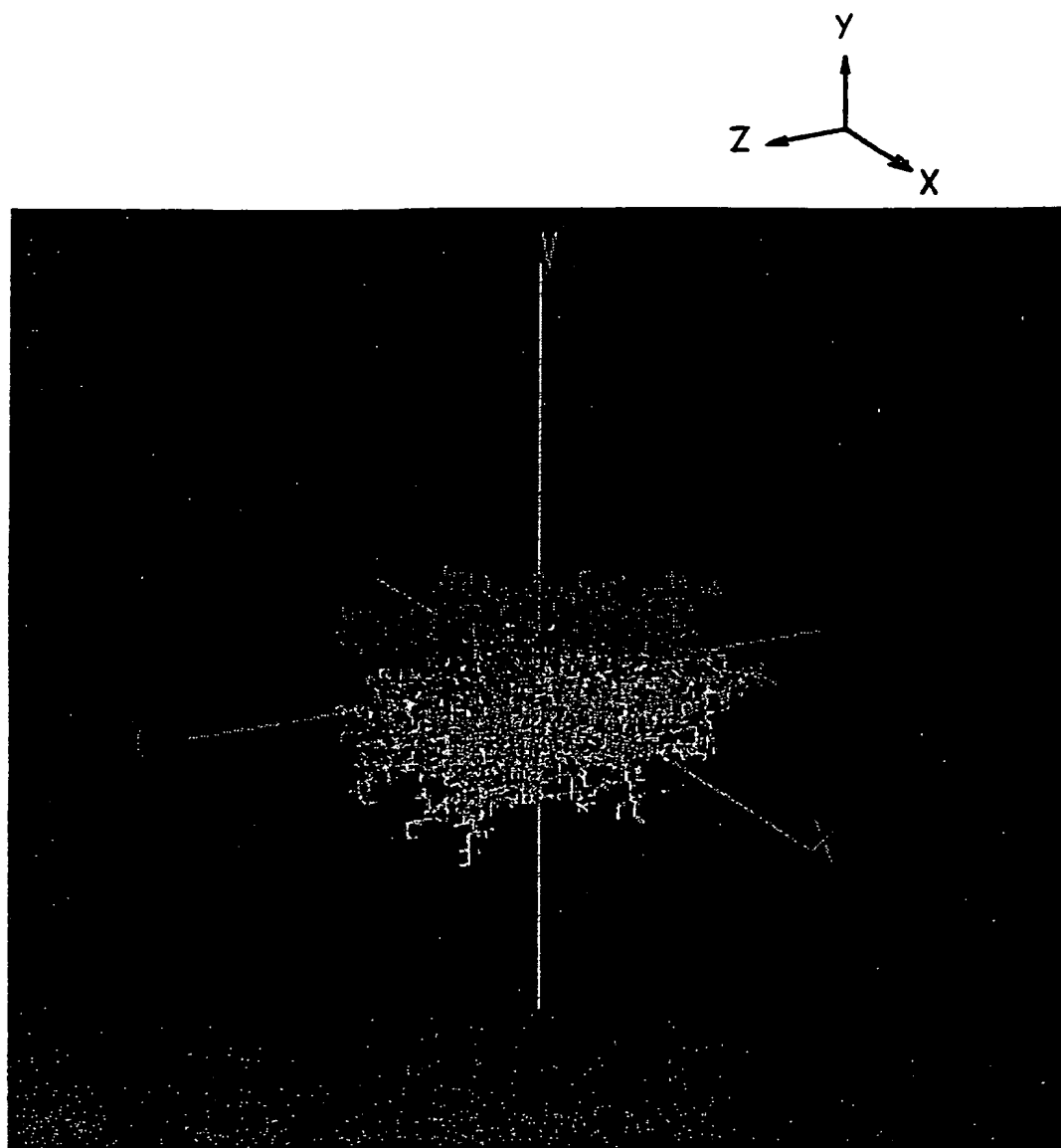
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第25図



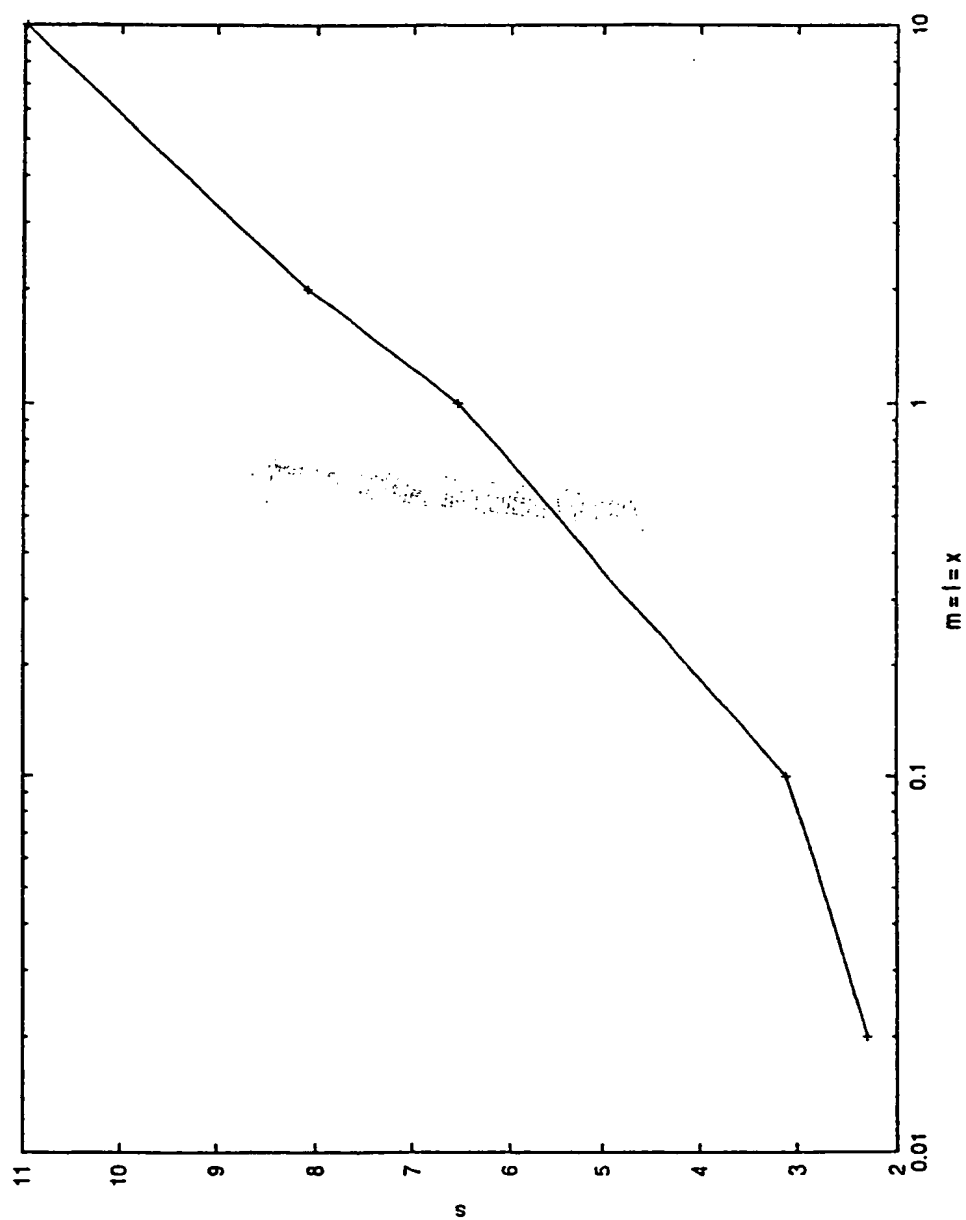
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第26図



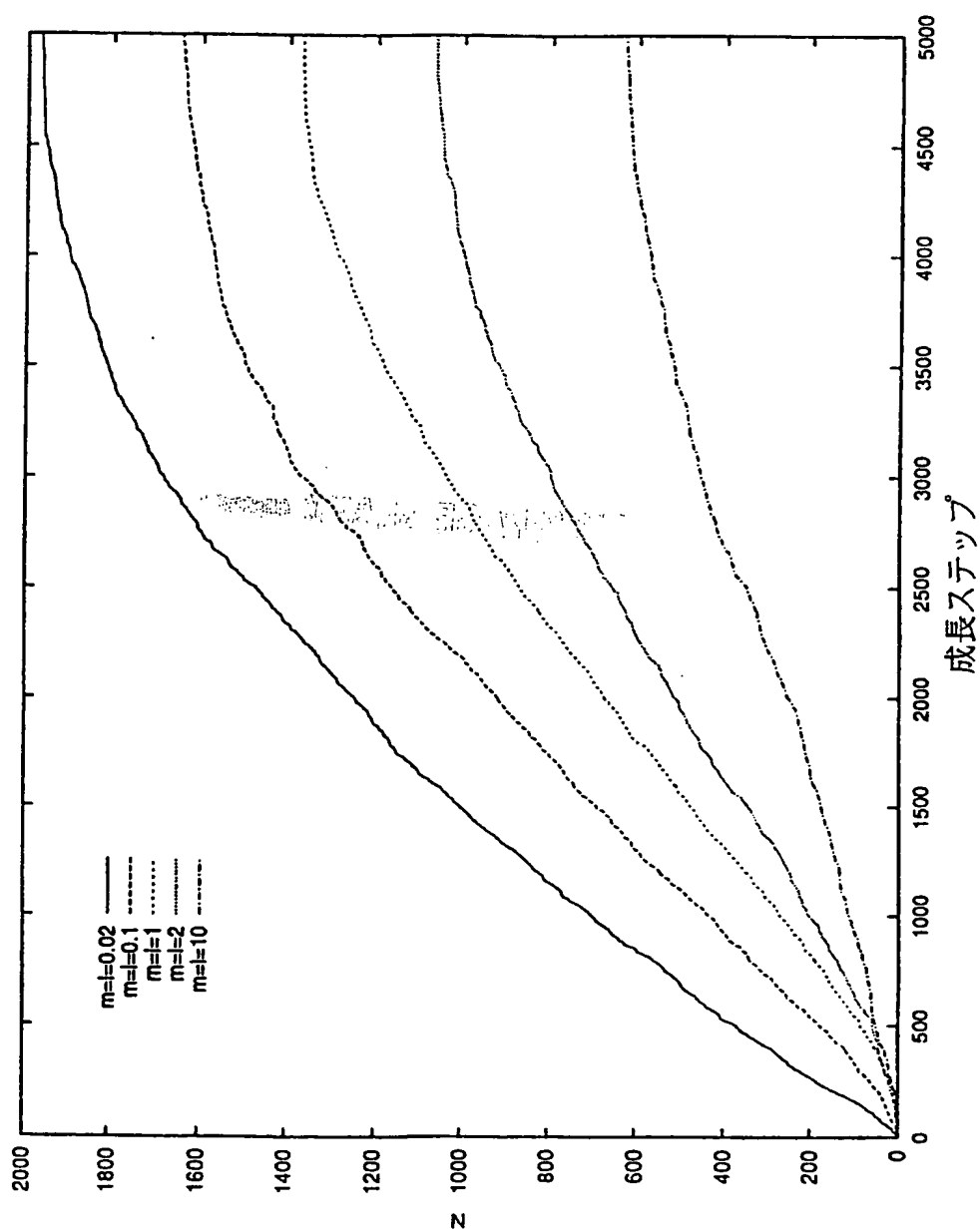
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第27図



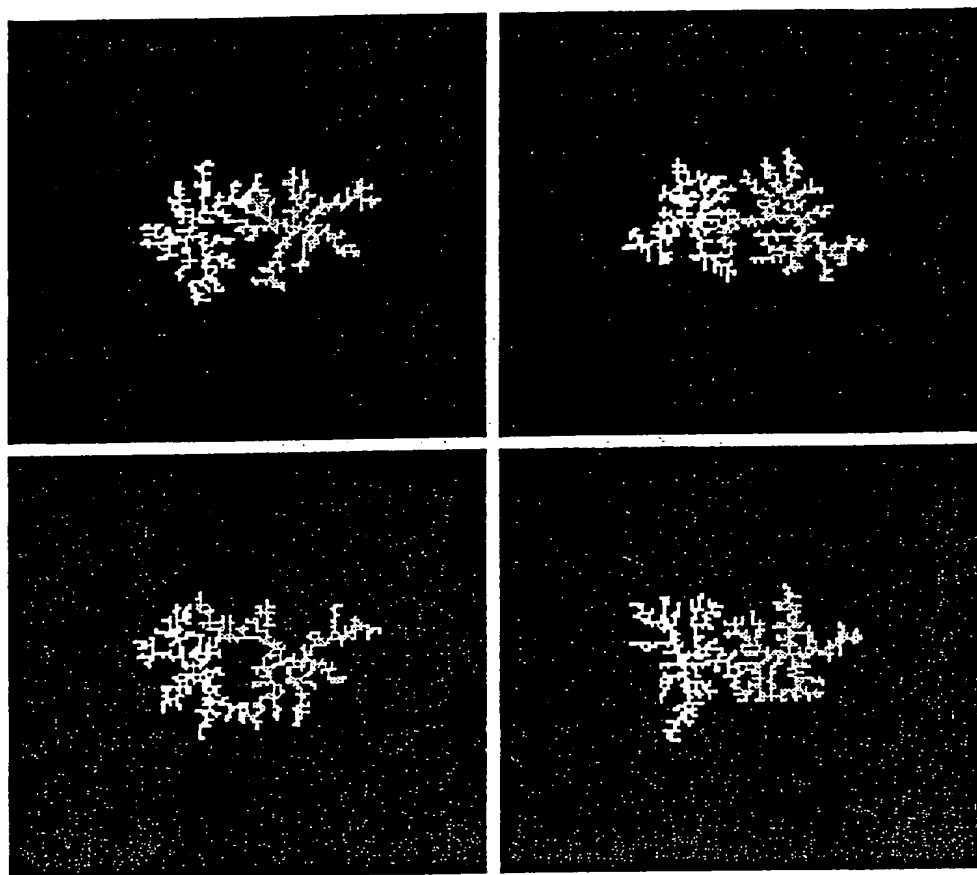
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第28図



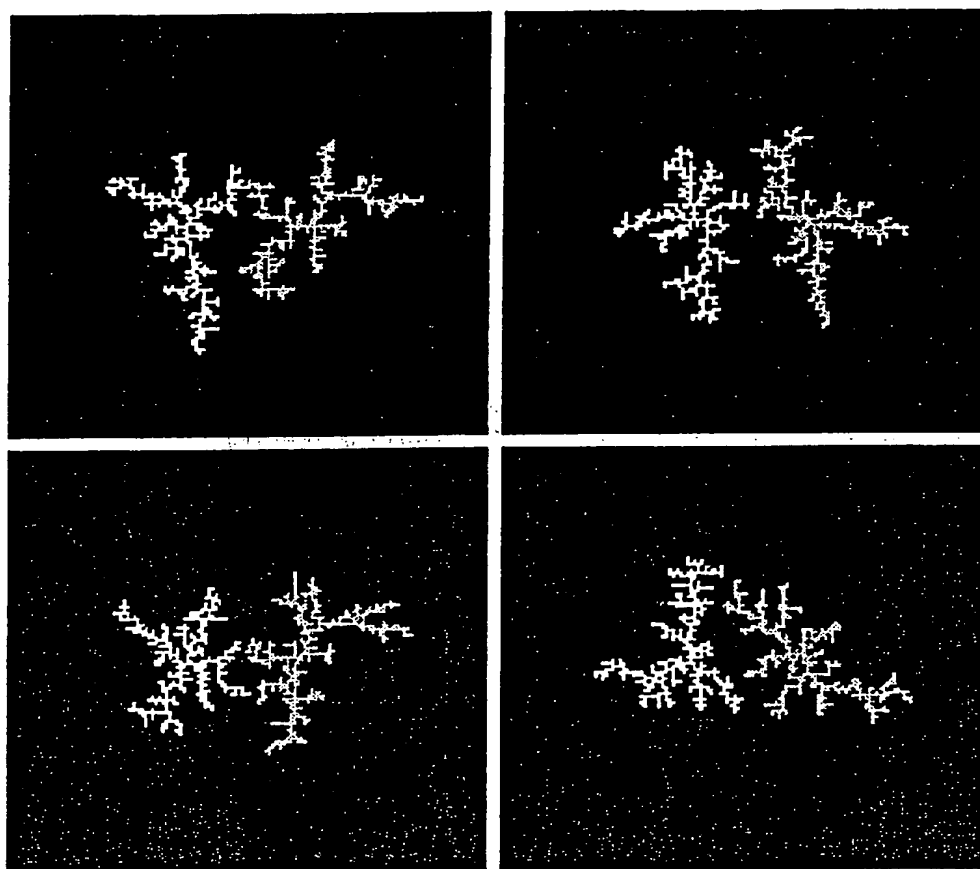
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第29図



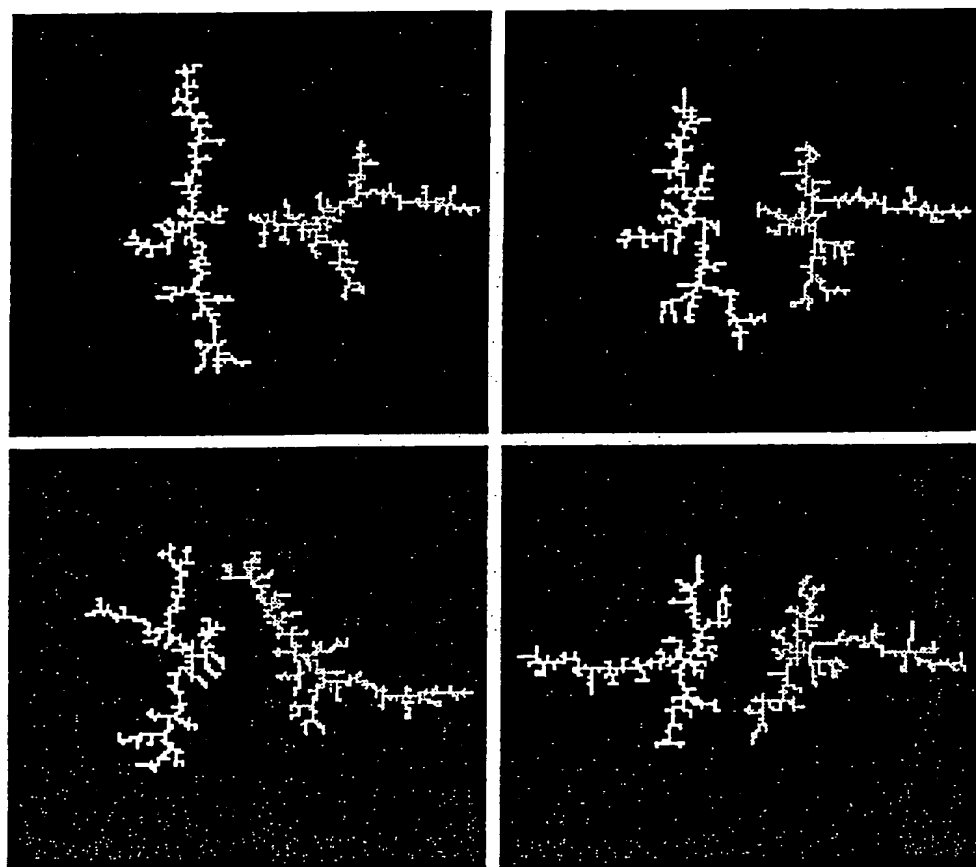
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第30図



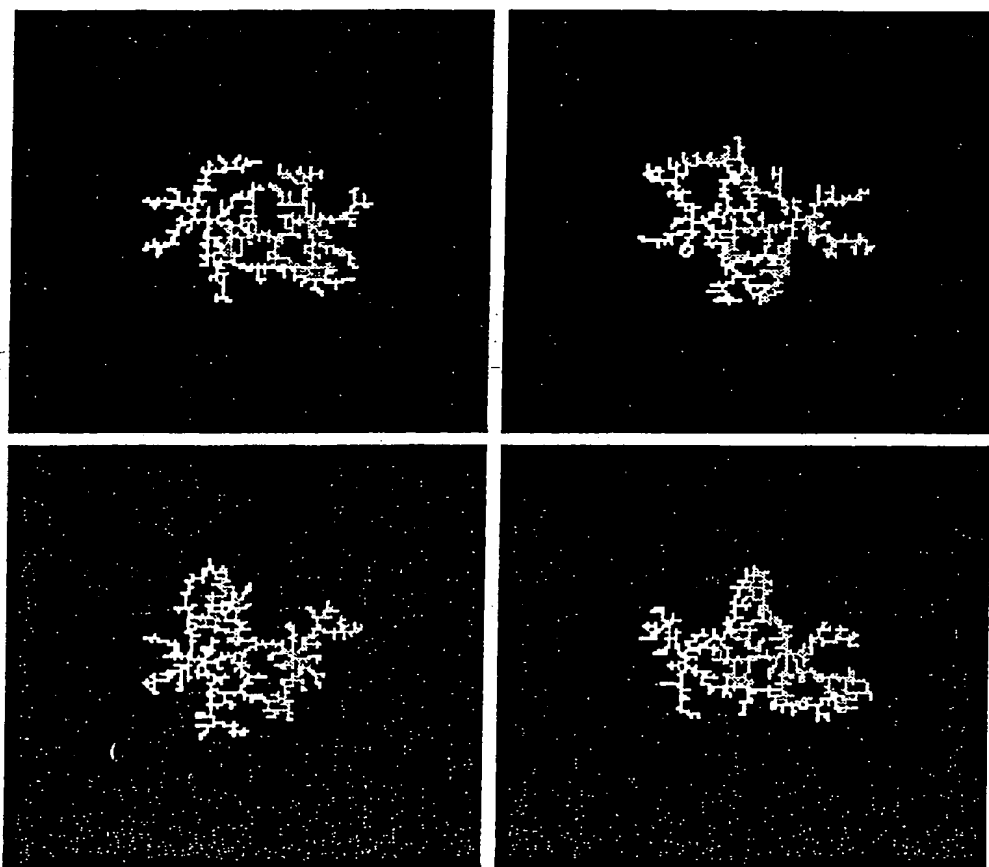
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第31図



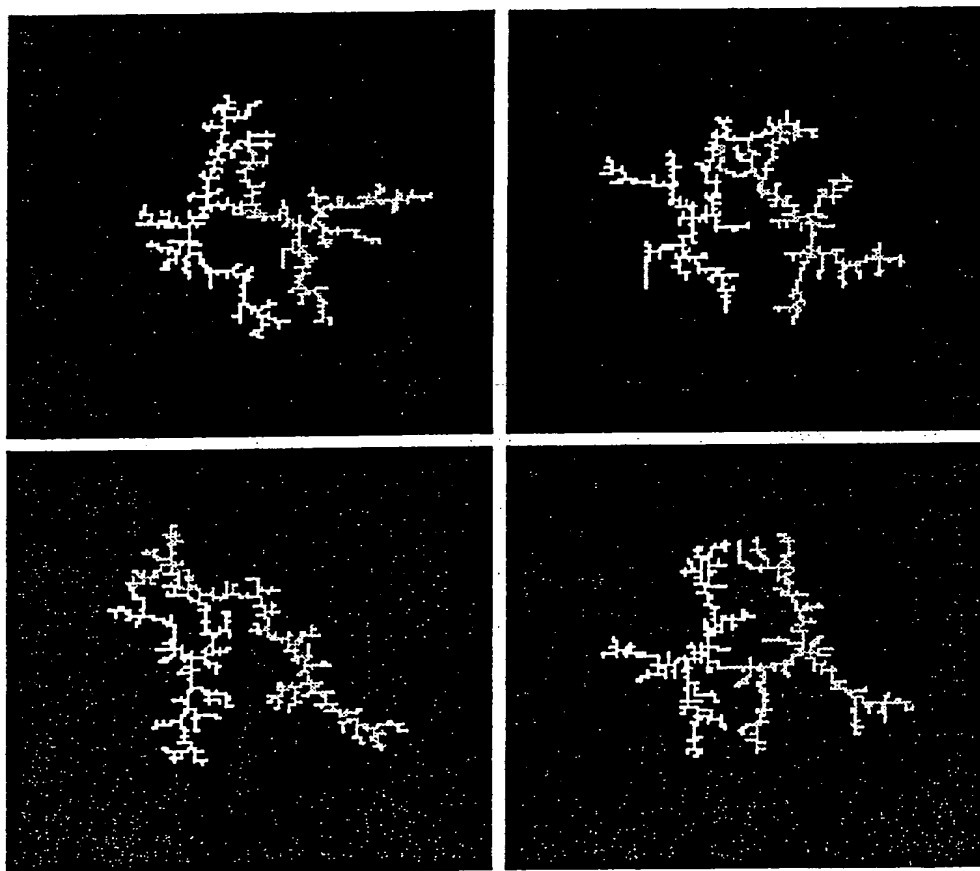
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第32図



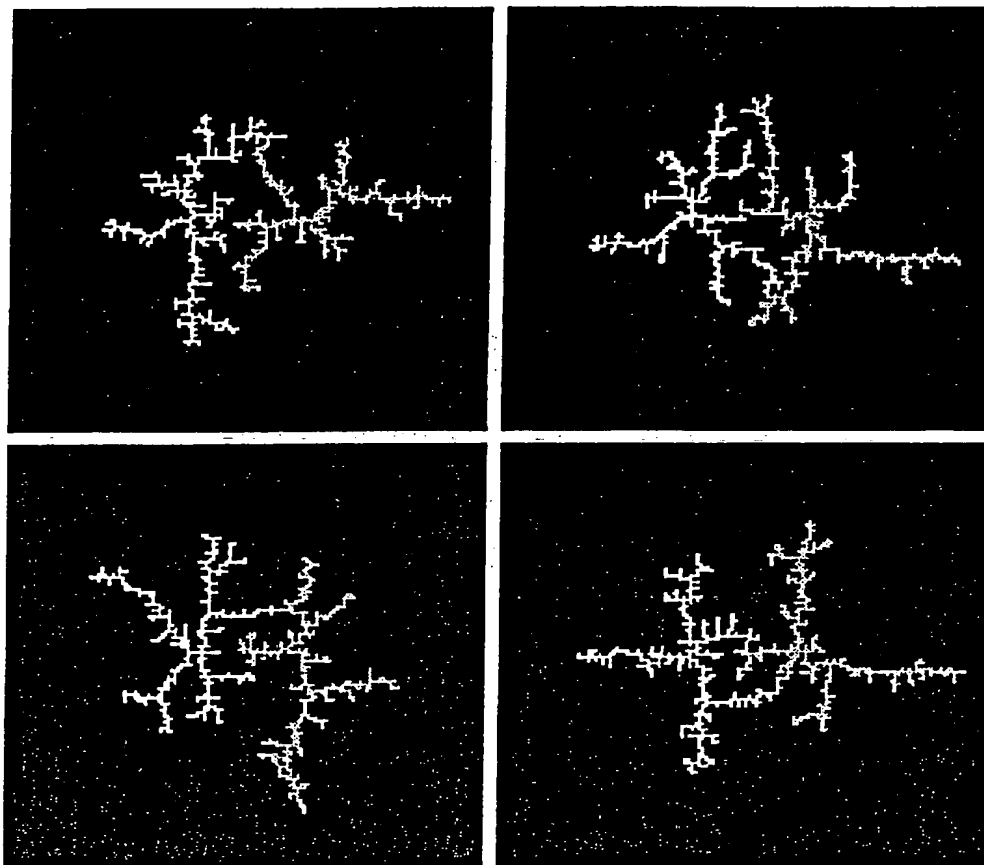
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第33図



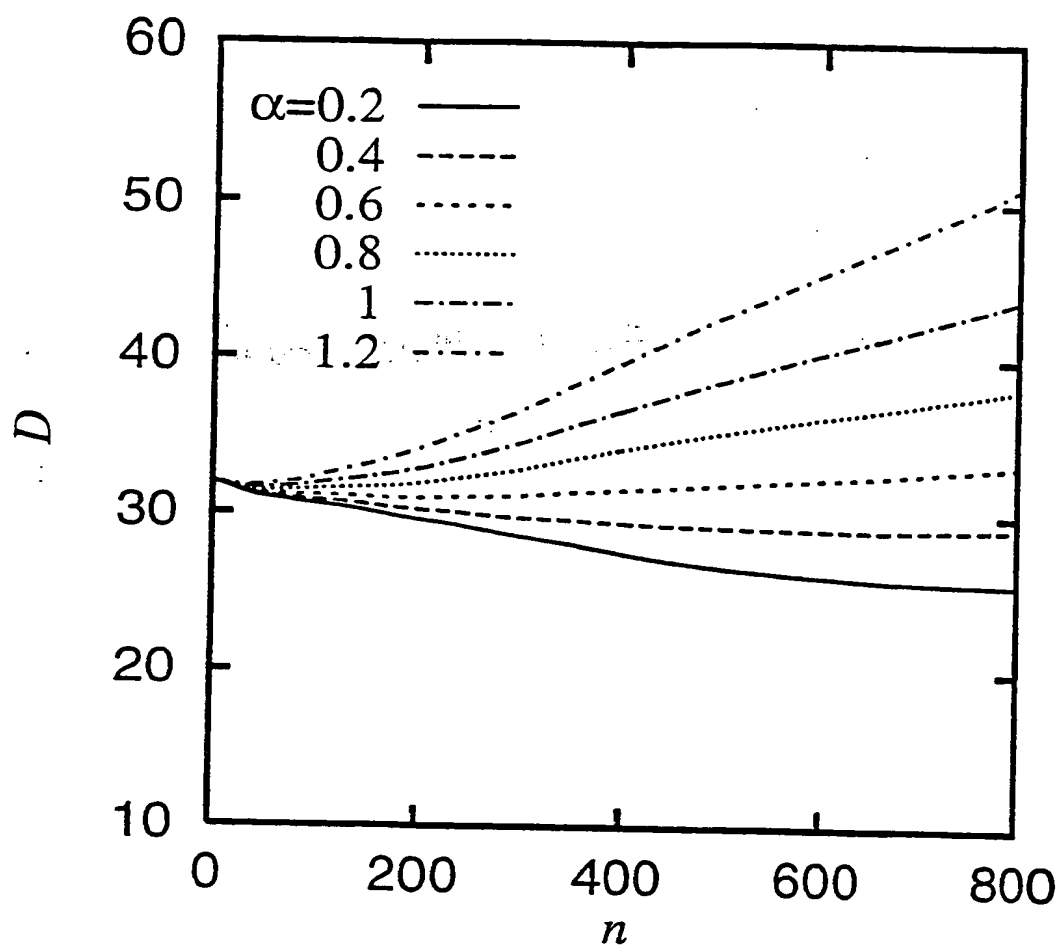
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第34図



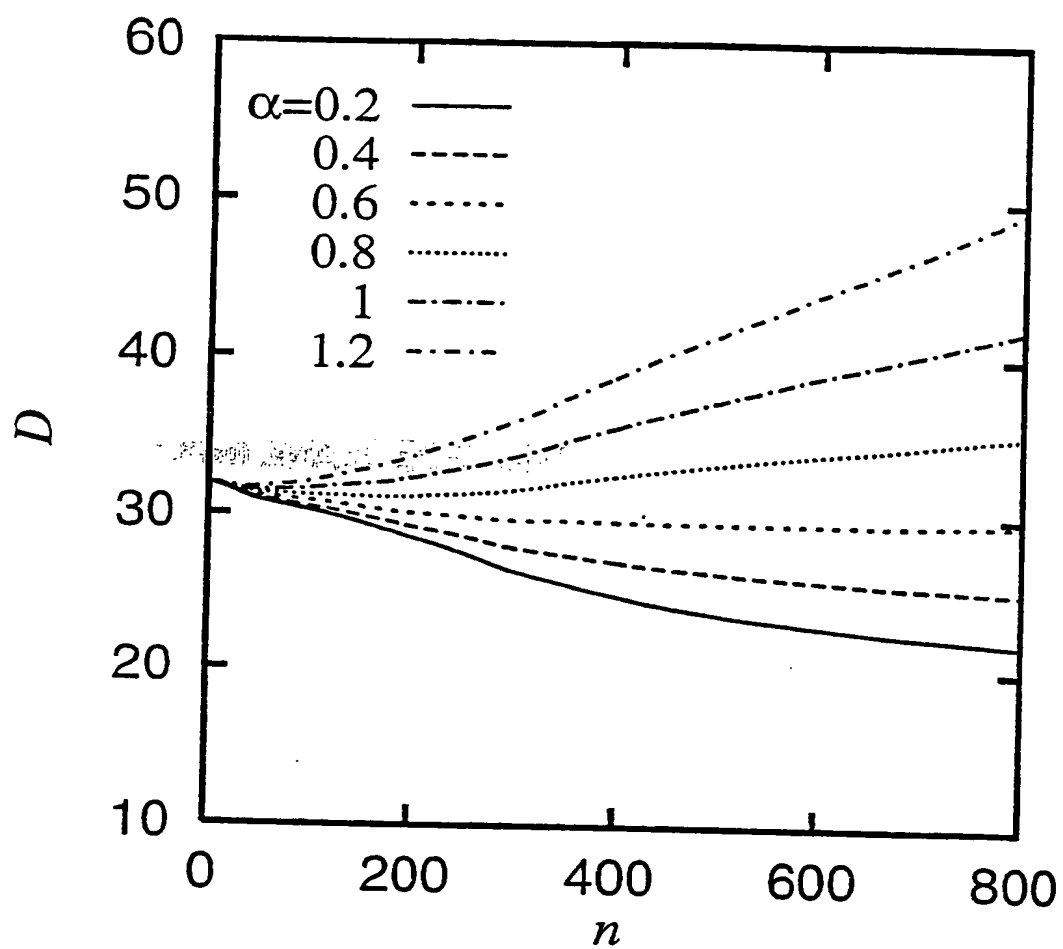
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第35図



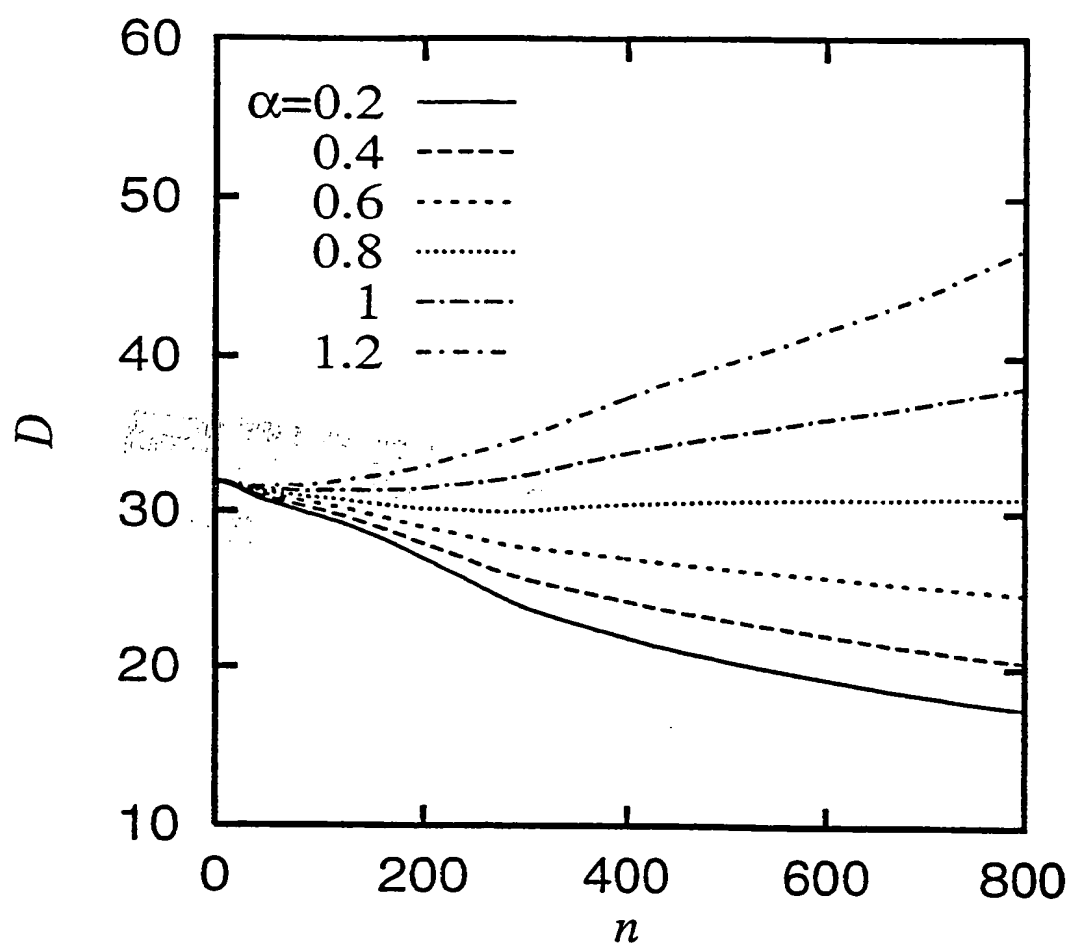
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第36図



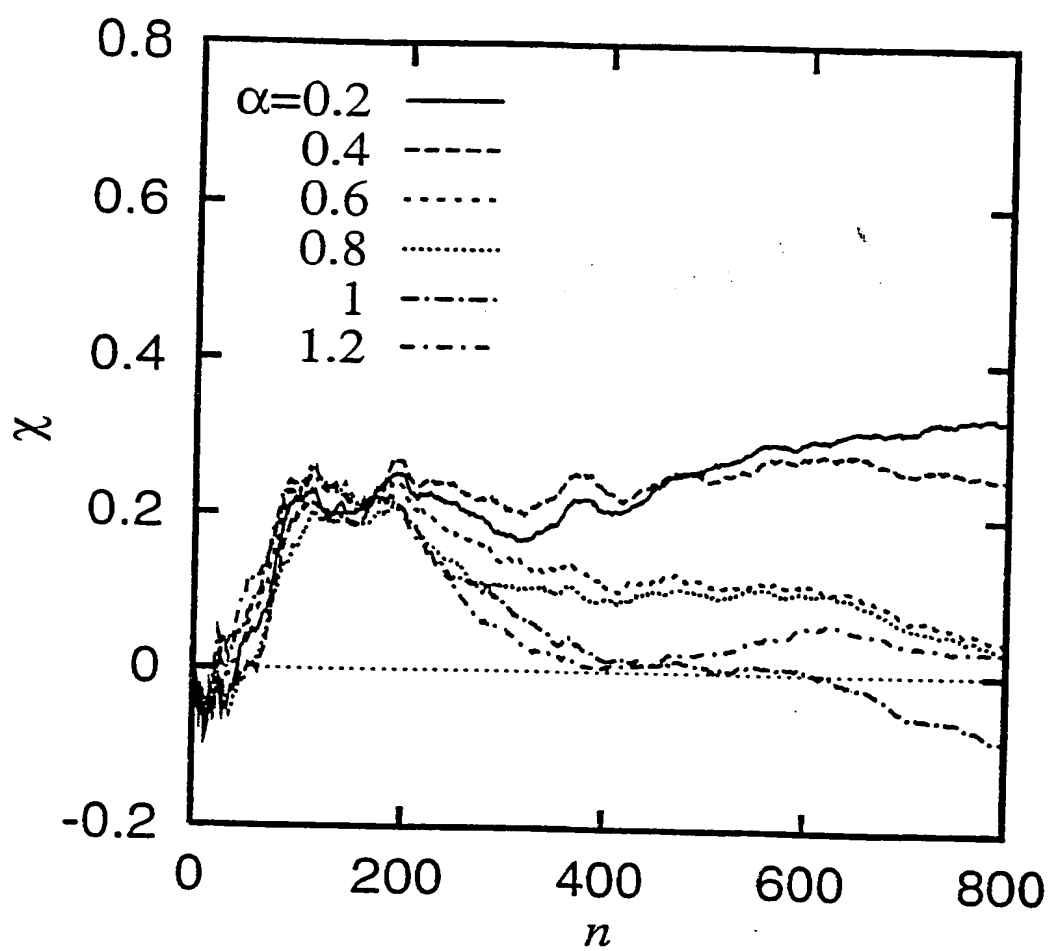
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第37図



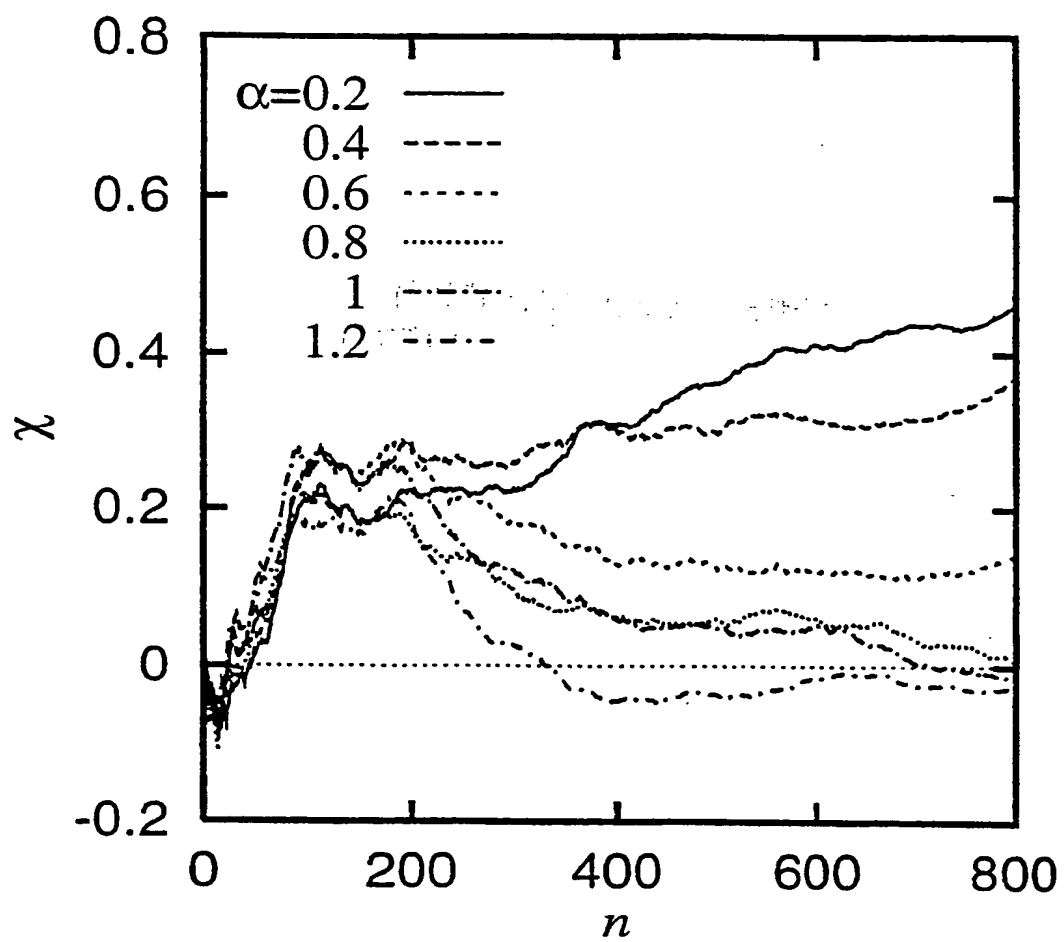
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第38図



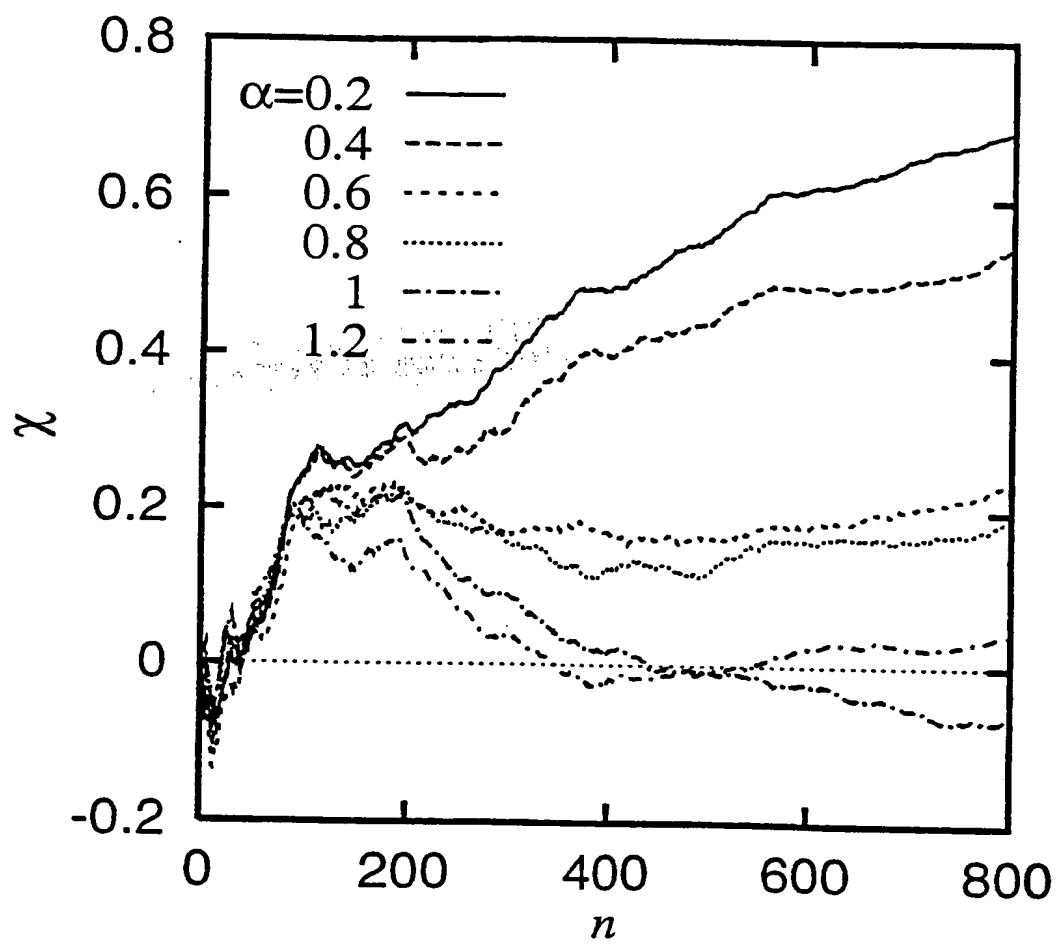
THIS PAGE BLANK (USPTO)

第39図



THIS PAGE BLANK (USPTO)

第40図



THIS PAGE BLANK (USPTO)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP00/04743

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl⁷ G06F17/10

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl⁷ G06F17/10

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2000
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2000 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2000

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
JICST FIL " (FRACTAL) * (NEURAL NET+GRAPH) " (in Japanese)
WPI "FRACTAL*NEURAL"
INSPEC "FRACTAL*NEURAL"

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Ling Zhang, Bo Zhang, and Gang Chen "Generating and Coding of Fractal Graphs by Neural Network and Mathematical Morphology Methods" IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS, MARCH 1996, VOL.7, NO.2, p400-407	1-11
A	Amita Chandra et al., "Fractal growth in uv-irradiated DNA: Evidence of nonuniversal diffusion limited aggregation", PHYSICAL REVIEW E, APRIL 1995, VOL.51, NO.4, p51.R2767-51. R2768	1-11
A	G. ALBINET & P. PELCE, "Computer simulation of neurite outgrowth", EUROPHYSICS LETTERS, MARCH 1996, VOL.33, NO.7, pp.569-574	1-11
A	Kenji INIWA, et al., "Fractal Moku Hyougen wo mochiita Denryoku Keitoku no Keitoku Jidou Sakusei Shuhou", Denki Gakkai Ronbun C, FEBRUARY, 1994, VOL.114-C, NO.2, pp.252-258	1-11

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier document but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
11 October, 2000 (11.10.00)

Date of mailing of the international search report
24 October, 2000 (24.10.00)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

THIS PAGE BLANK (USPTO)

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G06F17/10

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G06F17/10

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2000年
日本国実用新案登録公報	1996-2000年
日本国登録実用新案公報	1994-2000年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

JICST 科学技術文献ファイル 「(フラクタル) * (ニューラルネット+グラフ)」
 WPI 「FRACTAL*NEURAL」
 INSPEC 「FRACTAL*NEURAL」

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	Ling Zhang, Bo Zhang, and Gang Chen "Generating and Coding of Fractal Graphs by Neural Network and Mathematical Morphology Methods" IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS, MARCH 1996 VOL. 7, NO. 2, p400-407	1-11
A	Amita Chandra et al. "Fractal growth in uv-irradiated DNA: Evidence of nonuniversal diffusion limited aggregation" PHYSICAL REVIEW E, APRIL 1995, VOL. 51, NO. 4, p51.R2767-51.R2768	1-11

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

11.10.00

国際調査報告の発送日

24.10.00

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
 郵便番号 100-8915
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)
石井 茂和

5M 8837

電話番号 03-3581-1101 内線 6438

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	G. ALBINET & P. PELCE "Computer simulation of neurite outgrowth" EUROPHYSICS LETTERS, MARCH 1996, VOL. 33, NO. 7, p569-574	1 - 1 1
A	伊庭健二, 川崎龍子, 熊野長次郎「フラクタル木表現を用いた電力システムの系統図自動作成手法」電気学会論文誌C, FEBRUARY, 1994, VOL. 114-C, NO. 2, p252-258	1 - 1 1